

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikačnej techniky

Návrh zosilňovača v triede D
Amplifier class D design

2012

Bc. Peter Ciprich

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Peter Ciprich**
Studijní program: **N2647 Informační a komunikační technologie**
Studijní obor: **2601T013 Telekomunikační technika**
Téma: **Návrh zesilovače ve třídě D
Amplifier class D design**

Zásady pro vypracování:

1. Popište princip zesilovačů ve třídě D, porovnejte jejich vlastností s jinými třídami zesilovačů.
2. Navrhněte zapojení zesilovače ve třídě D, prověřte jeho vlastností a porovnejte s jiným zesilovačem třídy A, případně AB.

Seznam doporučené odborné literatury:

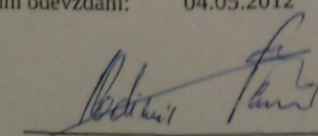
DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky díl IV*. 1. vydání. Praha : BEN, 2006. 295 s.
ISBN 80-7300-185-3.
ŠTÁL, P. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D*. 1. vydání. Praha: BEN, 2008. 198 s.
ISBN 978-80-7300-211-6.
ČERMÁK, J; JURKOVIČ, K. *Návrh a konstrukce nízkofrekvenčních tranzistorových zesilovačů*.
2. vydání. Praha : SNTL, 1974. 322 s.
BUDÍNSKÝ, J. *Nízkofrekvenční tranzistorové zesilovače*. 3. vydání. Praha : SNTL, 1964. 270 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

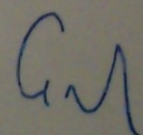
Vedoucí diplomové práce: **Dr. Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry

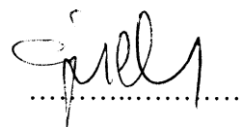



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dne: 30.4 2012

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Grell', written over a horizontal dotted line.

Podakovanie

Rád by som veľmi poďakoval pánu Dr. Ing. Liborovi Gajdošíkovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní a riešení tejto diplomovej práce.

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá a je zameraná na popis vlastností a princípu zosilňovača pracujúceho v triede D vrátane popisu jednotlivých tried zosilňovačov. Na začiatku práce je teoretická časť, ktorá obsahuje základný popis zosilňovačov a vysvetlením princípu funkcie zosilňovača triedy D. Po teoretickej časti nasleduje časť praktická, návrh zosilňovača triedy D. Základom je návrh blokovej schémy, z ktorej vychádza kompletný návrh jednotlivých blokov. V závere práce je overená funkčnosť zosilňovača triedy D odmeranie jeho základných vlastností a porovnanie vlastností so zosilňovačom pracujúcim v triede AB a následné zhrnutie a zhodnotenie výsledkov.

Kľúčové slová

zosilňovač, zosilňovač triedy D, zosilňovač triedy AB, pulzná šírková modulácia, trieda, návrh, blok, budič, MOSFET

Abstract

The diploma thesis describes characteristics and principle of class D amplifier as well as includes other classes amplifiers description. The thesis starts with theoretical part containing basic report of amplifiers and explanation of class D amplifier operation. After theoretical background, the practical part follows; the design of class D amplifier. The basic element is design of block diagram that forms complete proposal of all single blocks. In the conclusion, the functionality of class D amplifier is verified, measurement of its characteristics and comparison with class AB amplifier is assessed and summarised.

Key words

Amplifier, Class D Amplifier, Class AB Amplifier, pulse width modulation, class , design, block, driver, MOSFET

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$U, U_{cc}, U_{vst}, U_{výst}$	V	Napätie
I_C, I_B	A	Prúd
f_{min}, f_{max}	Hz	Frekvencia
η	%	Účinnosť

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
Napr.	for example	napríklad
Obr.	picture	obrázok
Pwm	pulse width modulation	impulzná šírková modulácia
Gnd	ground	zem
NF	low- frequency	nízkočfrekvenčný
VF	high-frequency	vysokočfrekvenčný
IO	Chip	integrovaný obvod
T ₁ , T ₂ , T ₃	tranzistor	tranzistor
cca	circa	circa
tzn.	it means	to znamená
LC	inductor(L) and capacitor (C)	cievka a kondenzátor

Obsah

1	Úvod	1
2	Zosilňovač	2
3	Triedy zosilňovačov	3
3.1	Trieda A	3
3.2	Trieda B	5
3.3	Trieda AB	7
3.4	Trieda C	9
3.5	Trieda D	10
3.6	Trieda G	11
3.7	Trieda H	11
3.8	Trieda S	12
3.9	Trieda T	12
4	Zosilňovač triedy D	14
5	Všeobecné blokové schéma triedy D	16
6	Impulzová šírková modulácia	18
7	Bloková schéma zosilňovača a návrh blokov	19
7.1	Návrh filtra typu horná prepust'	19
7.1.1	Schéma zapojenia filtra typu horná prepust'	20
7.1.2	Výpočet hodnôt súčiastok filtra typu horná prepust'	20
7.2	Návrh filtra typu dolná prepust'	21
7.2.1	Filter typu dolná prepust' 1.rádu	21
7.2.2	Filter typu dolná prepust' 2.rádu	22
7.2.3	Filter typu dolná prepust' 4.rádu	23
7.3	Návrh generátoru trojuholníkového signálu	26
7.4	Návrh komparátoru	27
7.4.1	Rozloženie vývodov obvodu LM311	28
7.4.2	Schéma zapojenia komparátoru	29

7.5	Návrh výkonovej časti zosilňovača triedy D	29
7.5.1	Riadenie výkonových MOSFET tranzistorov	30
7.5.2	Budič výkonových MOSFET tranzistorov	30
7.6	Návrh výstupného LC filtru typu dolná prepust'	33
8	Obvod TPA3122D2.....	34
9	Zosilňovač triedy AB s IO TDA2030	36
10	Namerané a vypočítané hodnoty zosilňovačov triedy D a AB.....	39
10.1	Zosilňovač triedy D s IO TPA3122D2	39
10.1.1	Výpočet účinnosti.....	39
10.1.2	Výpočet zosilnenia	40
10.1.3	Výpočet harmonického skreslenia	40
10.1.4	Meranie meznej frekvencie	41
10.2	Zosilňovač triedy AB s IO TDA2030	42
10.2.1	Výpočet účinnosti.....	42
10.2.2	Výpočet zosilnenia	43
10.2.3	Výpočet harmonického skreslenia	43
10.2.4	Meranie meznej frekvencie	44
11	Záver	45
	Použitá literatúra	46
	Zoznam príloh	xlvi

1 Úvod

Úlohou diplomovej práce je navrhnuť zapojenie zosilňovača pracujúceho v triede D. Práca je rozdelená na 2 časti – teoretickú a praktickú. Teoretická časť sa zaoberá všeobecným rozdelením zosilňovačov, popis jednotlivých tried zosilňovačov a porovnaní ich vlastností s inými triedami zosilňovačov. Teoretická časť je rozdelená do jednotlivé kapitoly. Prvá kapitola sa zaoberá pojmami ako čo je to zosilňovač, k čomu slúži a všeobecnému rozdeleniu zosilňovačov. Ďalšia kapitola obsahuje rozdelenie zosilňovačov podľa tried to znamená podľa polohy pracovného bodu. Samostatná kapitola je venovaná priamo zosilňovačom pracujúcich v triede D. Ďalej všeobecné blokové schéma . Nasledujúca časť rozoberá princíp pulzne šírkovej modulácie PWM, ktorá je použitá v návrhu zosilňovača. Ďalej nasleduje už navrhnuté blokové schéma podľa ktorého sa bude realizovať zosilňovač triedy D. Sú popísané jednotlivé bloky zosilňovača a ich funkcia.

Samostatná kapitola je venovaná návrhu a popisu jednotlivých blokov zosilňovača. Návrh filtrov, generátoru, komparátoru budiacej časti s výkonovými MOSFET tranzistormi.

Ďalšiu časť tvorí popis zapojenia zosilňovača triedy D, ktorý bol použitý pre meranie parametrov zosilňovača. Pre meranie parametrov bol použitý obvod TPA3122D2. Ako porovnávací zosilňovač bol použitý zosilňovač pracujúci v triede AB s obvodom TDA2030. Nasleduje časť kde sú popísané merané parametre a spôsob ich merania. Poslednou časťou práce sú výsledky meraní , zhodnotenie výsledkov a záver.

2 Zosilňovač

Zosilňovač je elektronické zariadenie, ktoré je schopné transformáciou elektrickej energie z vonkajšieho napájacieho zdroja meniť parametre vstupného signálu. Najčastejšie zosilňovač slúži predovšetkým k zosilneniu amplitúdy signálu, alebo jeho úrovne, na požadovanú hodnotu. Používa sa ale aj v zapojeniach, kde je potreba zmeniť tvar signálu a iných. Zosilňovače môžeme rozdeliť podľa toho aké aktívne súčiastky sú v nich použité a to na elektrónkové zosilňovače, tranzistorové zosilňovače, zosilňovače s integrovanými obvodmi a zosilňovače s inými súčiastkami (výbojky, relé, optoelektronické prvky, ...)

Z architektúry zosilňovača vyplýva celý rad jeho základných charakteristík. Z tohto hľadiska je možné zosilňovače rozdeliť do niekoľkých skupín:

Podľa veľkosti signálu:

- Predzosilňovače
- Výkonové zosilňovače

Podľa charakteru vstupného signálu:

- Jednosmerné
- Striedavé

Podľa frekvencie spracovaného signálu:

- Nízkofrekvenčné
- Vysokofrekvenčné

Podľa prenášaného frekvenčného pásma:

- Úzkopásmové
- Širokopásmové

Podľa vnútornej štruktúry

- Jednostupňové
- Viacstupňové
- Kombinované

Podľa spôsobu činnosti

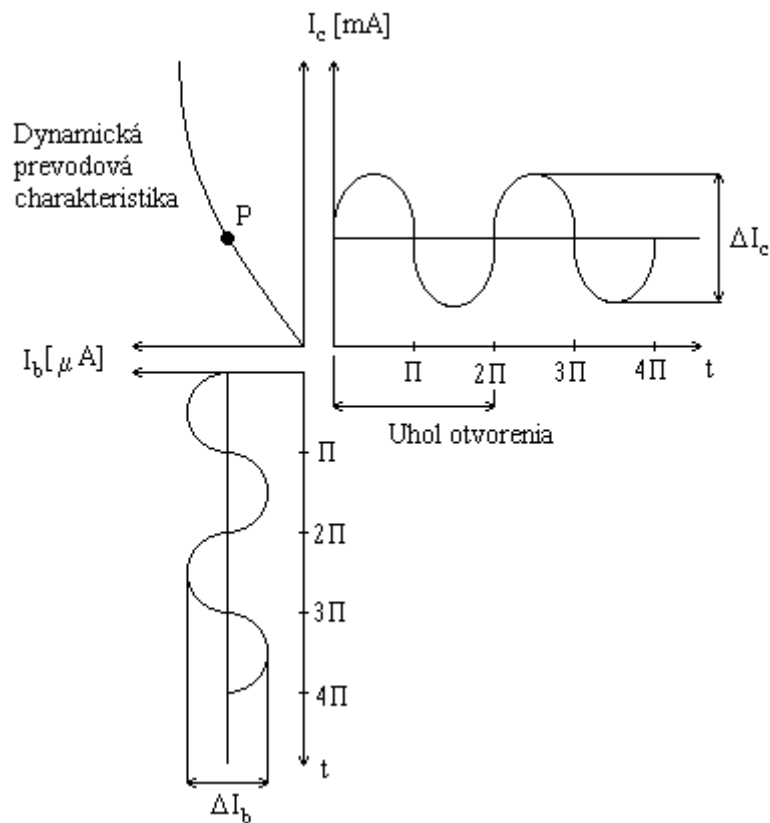
- Jednočinné
- Dvojčinné

Ďalej je možné zosilňovače rozdeliť podľa polohy pracovného bodu, toto rozdelenie sa nazýva trieda zosilňovača.

3 Triedy zosilňovačov

3.1 Trieda A

Súčiastky zosilňovača triedy A sú zapojene jednočinne. Tzn, že jedna vetva spracúva obidve polovice (+ i -, viz. Trieda B) predchádzajúceho signálu. Súčiastky zosilňovača triedy A majú nastavený taký kludový prúd, aby boli stále vo vodivom stave. Vďaka veľkému kludovému prúdu majú zosilňovače triedy A najmenšie skreslenie. Vďaka tak vysokému prúdu sú ale veľmi náročné na konštrukciu. Vyžadujú vysoký príkon (veľké nároky na napájanie) a väčšina tohto príkonu sa mení na teplo. Dôsledkom toho sú aj vysoké nároky na chladenie zosilňovača. To sú dôvody prečo sú zosilňovače triedy A veľmi drahé a predávajú sa veľmi málo (na Hi-End trhu je ich podiel asi 10%). Trieda A je definovaná umiestnením kludového pracovného bodu P_0 v strede lineárnej časti prevodovej charakteristiky a uhol otvorenia $2\alpha_0 = T = 360^\circ$, tak že prúd tečie tranzistorom počas celej periódy vstupného signálu. Pri pôsobení vstupného (budiaceho) signálu (prúd, napätie) sa mení výstupná veličina tak, že nezaniká. Je to časový uhol, pri ktorom v intervale jednej periódy budiaceho sínusového priebehu prechádza prúd výstupným obvodom zosilňovača. V režime triedy A pracuje väčšina zosilňovačov. [2]



Vlastnosti :

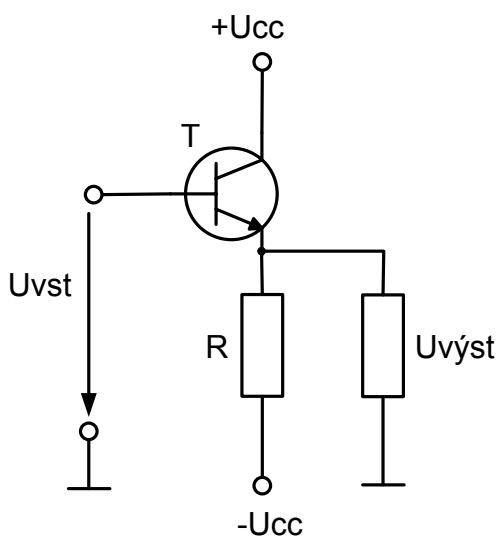
Uhol otvorenia: $2\alpha_0 = T = 360^\circ$

Zosilnenie: Maximálne

Skreslenie: Minimálne

Účinnosť: malá (pre sinusový signál max. 25 %)

Použitie: nízkofrekvenčné zosilňovače
a vysokofrekvenčné predzosilňovacie stupne



Obr.č. 1 Zjednodušené zapojenie zosilňovača triedy A

Koncový tranzistor je v zosilňovači pracujúcom v triede A riadený v lineárnej oblasti. To však znamená, že tranzistorom preteká pomerne vysoký kludový prúd a je teda možné dosiahnuť účinnosti maximálna iba cca 10%. Ku zväčšeniu účinnosti by bolo treba zväčšiť amplitúdu vstupného signálu, čo by ale viedlo k veľmi veľkému skresleniu, ktoré je obvykle kompenzované zápornou spätnou väzbou.

Výhody:

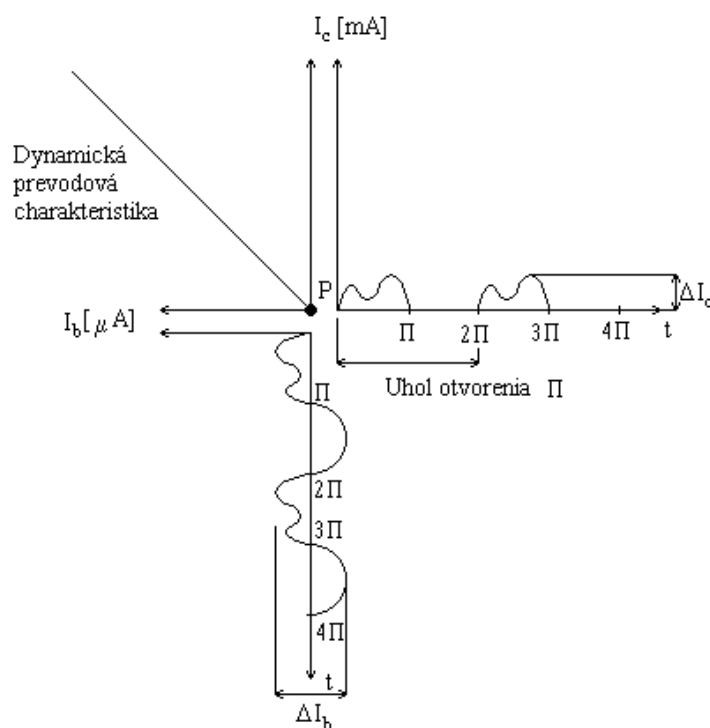
- zo všetkých tried najmenšie skreslenie signál

Nevýhody:

-malá energetická účinnosť koncového stupňa

3.2 Trieda B

Výkonové súčiastky zosilňovača triedy B sú zapojené dvojčinne (v dvoch vetvách) a majú nastavený nulový kľudový prúd. Jedna vetva spracováva iba kladnú polovicu signálu a druhá vetva spracováva iba zápornú polovicu. Tieto vetvy sa tak striedajú a doplňujú vo svojej činnosti. Pretože prechod z nevodivého do vodivého stavu súčiastok je nelineárny, vzniká pri prechode signálu nulou (zmena polarita z + na -) tzv. prechodové skreslenie. Toto skreslenie je tak veľké, že je pomerne dobre počuteľné, hlavne pokiaľ má signál malú amplitúdu. Preto sa tieto zosilňovače v NF technike príliš neuplatňujú. Výhodou týchto zosilňovačov je energetická úspornosť. Bez signálu neodoberajú žiadny prúd a pri malom signáli odoberajú iba malý prúd. Trieda B je definovaná umiestnením kľudového pracovného bodu P_0 do miesta zániku kolektorového prúdu, takže uhol otvorenia $2\alpha_0 = T/2 = 180^\circ$ a tranzistorom tečie prúd počas celej polperiódy vstupného signálu. [2]



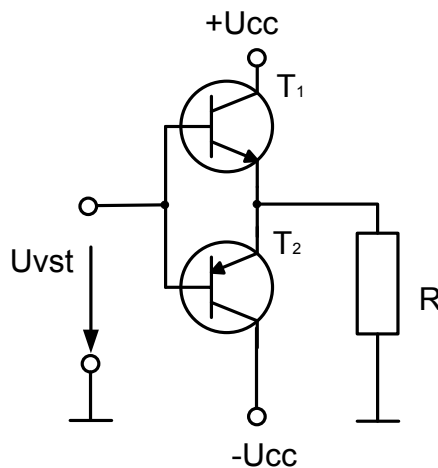
Vlastnosti:

Uhol otvorenia: $2\alpha_0 = T/2 = 180^\circ$

Zosilnenie: Stredné

Skreslenie: veľké

Účinnosť: maximálna (teoretický 50%)



Obr.č. 2 Zjednodušené zapojenie zosilňovača triedy B

Prakticky sa trieda B v zapojení s jedným tranzistorom nepoužíva. Používa sa v tzv. dvojčinnom zapojení (účinnosť teoreticky 78%) Použitie: v koncových stupňoch NF zosilňovačov

Použitím dvoch komplementárnych tranzistorov, ktorými nepreteká žiadny kľudový prúd, umožňuje podstatné zvýšenie účinnosti. To ale aj pri zavedení zápornej spätnej väzby spôsobuje značné prechodové skreslenie, ktoré sa prejavuje predovšetkým u signálov s menšou amplitúdou.

Výhody:

-oproti triede A je podstatne väčšia účinnosť

Nevýhody

- veľké nelineárne skreslenie signálu

3.3 Trieda AB

Táto trieda je vlastne kompromisom medzi triedami A a B. Konštrukčne je zosilňovač rovnaký, ako zosilňovač v triede B, ale s tým rozdielom, že trieda AB má zavedený malý kľudový prúd ktorý posúva ich pracovné body bližšie k lineárnej oblasti a znižuje tak prechodové skreslenie. Pracovný bod v triede AB je teda zvolený tak, aby bola odstránená najväčšia nelinearita výstupného signálu. Táto nelinearita je spôsobená tým, že je nutné medzi bázu a emitor tranzistoru priviesť podľa typu určitú veľkosť signálu, aby sa tranzistor dostal do aktívnej oblasti. Trieda AB taktiež nie je tak energeticky náročná ako trieda A. Z týchto dôvodov sa stali zosilňovače triedy AB veľmi obľúbenými, väčšina lineárnych zosilňovačov pracuje práve v tejto triede. Trieda AB bola donedávna v audio zosilňovačoch najrozšírenejšia. Účinnosť by za ideálnych podmienok teoreticky mohla dosiahnuť aj 75%, čo je ale v praxi nereálne a stretávame sa skôr s maximálnou účinnosťou 50% až 60%. Účinnosť samozrejme závisí opäť na amplitúde vstupného signálu. Väčšie amplitúdy však obvykle znamenajú aj väčšie skreslenie. [2]

Výhody:

- Veľké zníženie veľkosti nelineárneho skreslenia oproti triede B
- Väčšia účinnosť oproti triede A

Nevýhody:

- V kľudovom stave preteká tranzistorom prúd, je menšia účinnosť ako v triede B
- Pre zosilnenie signálu je potrebné samostatne zosilniť kladnú a samostatne zápornú polovlnu tak isto ako je to aj u triedy B. [4]

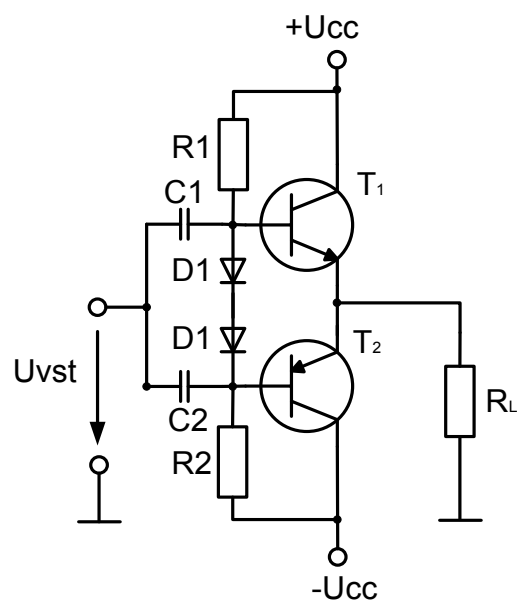
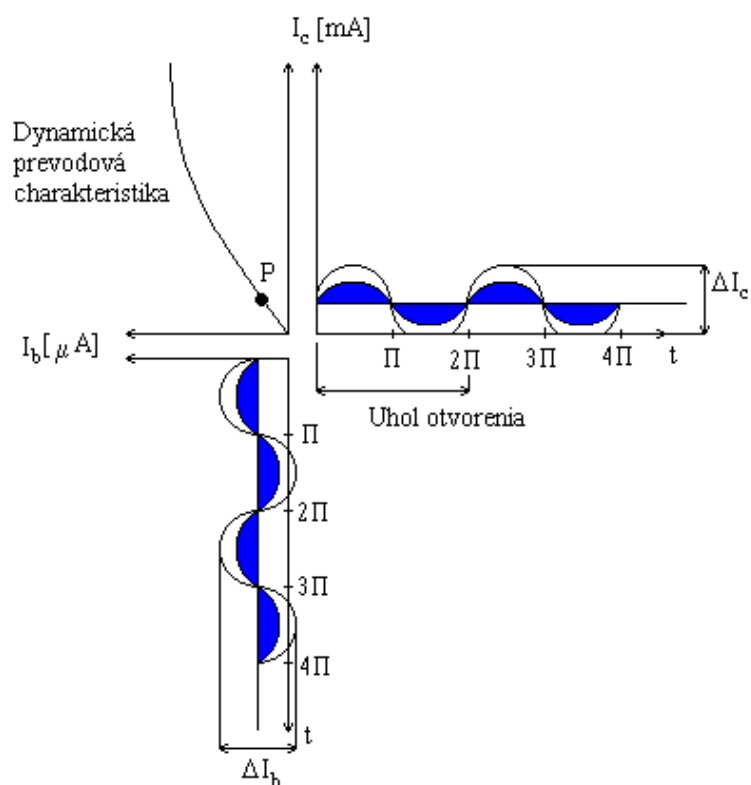
Vlastnosti:

Uhol otvorenia: $2 a_0 = T/2 = 180^\circ$

Zosilnenie: Stredné

Skreslenie: veľké

Účinnosť: stredná (teoretický 75%)



Obr.č. 3 Zjednodušené zapojenie zosilňovača triedy AB

3.4 Trieda C

Trieda C je definovaná umiestnením kludového pracovného bodu P_0 za miesto zániku kolektorového prúdu, takže tranzistorom tečie prúd v kratšom čase ako je polperióda vstupného signálu. Trieda C je preto v podstate nelineárna. Takže trieda C je vlastne nepoužiteľná okrem zosilňovania impulzných priebehov. Výkonové súčiastky zosilňovača v tejto triede majú nulový kludový prúd a navyše majú zavedené predpätie, ktoré ich ďalej uzatvára. Preto prechádzajú z nevodivého do aktívneho stavu až v špičkách vstupného signálu, ktorých veľkosť dosahuje rádu desiatok percent napájacieho napätia.

Skreslenie výstupného signálu je preto omnoho výraznejšie ako v triede B. Z tohto dôvodu sú výkonové zosilňovače v triede C v NF technike nepoužiteľné. Avšak ak vhodne zvolíme rezonančnú záťaž je možné s nelineárnymi priebehov kolektorového prúdu získať základnú sínusovú harmonickú zložku. Impulzmi kolektorového prúdu budíme rezonančný obvod, ten sa následne rozkmitá a tým sa eliminujú straty v reálnom rezonančnom obvode. Výhodou takýchto rezonančných zosilňovačov ktoré pracujú v triede C je vysoká účinnosť, teoreticky $\eta \rightarrow 100\%$. Požiť ich môžeme prevažne ako koncové stupne vysielacích antén ktoré majú na výstupe ladený obvod a sú používané pre napájanie vysielacích antén. [2],[4]

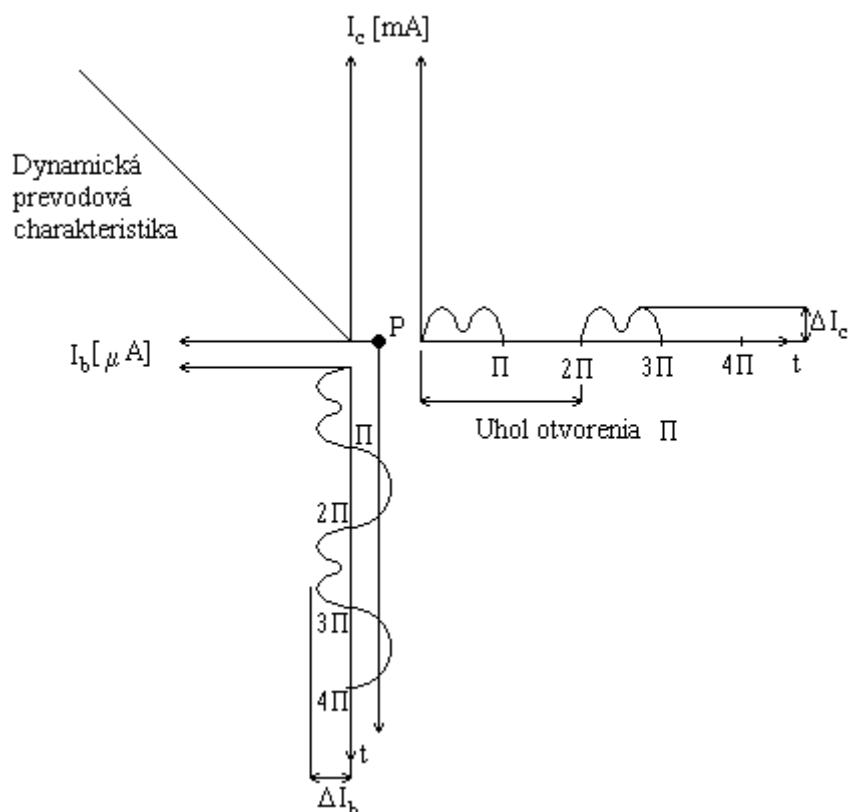
Vlastnosti:

Uhol otvorenia: $2 a_0 < T/2 = 180^\circ$

Zosilnenie: Malé

Skreslenie: Veľké

Účinnosť: Veľká



3.5 Trieda D

Tieto zosilňovače už nie sú lineárnymi zosilňovačmi pretože používajú techniku pulznej šírkovej modulácie PWM. Pre tieto zosilňovače sa zaužívalo označenie digitálne. Najväčšou výhodou tejto konštrukcie je vysoká účinnosť, až 90% (zosilňovače triedy B majú účinnosť menšiu ako 78% a s triedou A je to ešte horšie). Táto vysoká účinnosť vyplýva z princípu činnosti výkonových tranzistorov zosilňovača. Tieto sú totiž buď plne zapnuté alebo úplne vypnuté. Z toho vyplýva ale aj nevýhoda - väčšie skreslenie, ako majú zosilňovače tried A a AB. Zosilňovače triedy D sú ale relatívne nové a sú teda ešte vo vývoji (môžeme teda očakávať zlepšenie technológie).

Zatiaľ čo vyššie uvedené triedy, ktoré som popisoval si boli navzájom do určitej miery podobné, zosilňovače v triede D prichádzajú s celkom novou a inou koncepciou. Výkonové tranzistory sú prevádzkované ako spínače, pracujú v oblasti saturácie. Takže je na nich teda minimálny úbytok napätia a tým pádom aj minimálny stratový výkon.

Výkonové zosilňovače v triede D spracovávajú analógový signál, ako som už spomínal vyššie, s použitím pulznej šírkovej modulácie PWM, čo je kľúčom k dosiahnutiu veľkej účinnosti tohto typu výkonových zosilňovačov. Na výstupe zosilňovača sú pravouhlé impulzy o vysokom kmitočte s premennou šírkou , ktorá nesie informáciu o analógovom vstupnom signáli.[1],[2]

Výhody: veľká účinnosť, pohybujúca sa okolo 85% a viac.

Nevýhody: bežne väčšie skreslenie, ako u zosilňovačov v triede A alebo AB

3.6 Trieda G

Výkonové zosilňovače v triede G využívajú koncový stupeň v triede AB, takže sa vlastne nelíšia v práci samotného koncového stupňa. Líšia sa však v spôsobe napájania koncových tranzistorov, ktoré je buď dvoj alebo viacstupňové, čo zjednodušene znamená, že sa veľkosť napájacieho napätia koncového stupňa prispôsobuje veľkosti požadovaného výstupného výkonu. Pri menšom výkone pracuje koncový zosilňovač s menším napájacím napätím, a keď výstupný výkon presiahne určitú nastavenú veľkosť, je pripojené väčšie napájacie napätie, aby koncový stupeň mohol dodať väčší výstupný výkon. [2]

Výhody: zväčšená účinnosť oproti pracovnej triede AB

Nevýhody: zložitejší návrh zapojenia

3.7 Trieda H

Výkonové zosilňovače v tejto triede majú rovnaký základ ako zosilňovače v triede G, ale veľkosť napájacieho napätia koncového stupňa sa v tomto prípade nemení skokovo, ale presne sleduje veľkosť vstupného signálu. Napájacie napätie koncového stupňa je tak dodržané tak presne na takej úrovni, aká je potrebná pre zachovanie správnej činnosti výkonových súčiastok s ohľadom na aktuálnu veľkosť požadovaného výstupného výkonu. Na výkonových súčiastkach zosilňovača je teda vždy konštantný úbytok napätia.[2]

Výhody: ešte väčšia účinnosť ako u triedy G

Nevýhody: značná zložitosť zapojenia

3.8 Trieda S

Takto bývajú označované modernejšie typy spínacích (alebo digitálnych) výkonových zosilňovačov, ktoré sa od triedy D líšia tým, že vďaka implementácii novších metód digitálneho spracovania signálu už na výstupe nepotrebujú LC filter k potlačeniu spínacieho kmitočtu a ďalších produktov spínania –tzv. spínacie zosilňovače „**Filterless**“. [2]

Výhody:

- veľká účinnosť, pohybujúca sa okolo 80 % a viac
- nepotrebujú filter LC k potlačeniu spínacieho kmitočtu

Nevýhody:

- bežne väčšie skreslenie, ako sa dosahuje u zosilňovačov v triede v triede A a AB

3.9 Trieda T

Výkonové zosilňovače v triede T tvoria princípom činnosti a z toho vyplývajúcimi dosiahnutými parametrami prielom v nelineárnom, digitálnom spracovaní signálu. Výkonové zosilňovače pracujú na podobnom princípe ako zosilňovače triedy D, ale s použitím vylepšeného a veľmi dobré prepracovaného algoritmu riadenia. Výsledkom je účinnosť výkonového zosilňovača okolo 90 % a predovšetkým to, že zosilňovače tejto triedy dosahujú veľmi vynikajúcich zvukových parametrov.

Firma Tripath Technology vyvinula špeciálny algoritmus pre moduláciu spracovaného nízkočfrekvenčného vstupného signálu vzorkovaním signálu s vysokým kmitočtom. Technológia kombinuje analógové aj digitálne spracovanie signálov a celý algoritmus bol vyvinutý na základe najnovších poznatkov. Spomínaný originálny algoritmus je odvodený od algoritmov využívaných najmä v signálových procesoch pre telekomunikácie. Výkonové zosilňovače s týmito obvodmi dosahujú vynikajúcich kvalitatívnych parametrov, medzi ktoré v prvom rade patrí veľmi malé skreslenie a vysoká účinnosť pri dosiahnutých veľkých výstupných výkonoch.

Z veľkej účinnosti zosilňovačov automaticky vyplýva rada ďalších výhod, ako sú minimálne nároky na chladenie a následne aj nižšie náklady s tým spojené. Potreba buď žiadneho alebo len veľmi malého chladiča prispieva k celkovej robustnosti zosilňovača a kompaktnosti riešenia. Aj cena je s ohľadom na dosiahnuté vynikajúce parametre nízka a celkové riešenie svojím spôsobom jednoduché. Radu výkonových zosilňovačov v triede T od firmy Tripath Technology tvorí v súčasnom čase viac ako jednu desiatku obvodov. Prvé tri obvody (TA1101 B, TA2020-020 a TA 2022) sú úplné výkonové zosilňovače, teda vrátane koncového stupňa s výkonovými tranzistormi, ktoré sú súčasťou čipu integrovaného obvodu.

Ostatné obvody (TA3010, TA0102A, TA0103A a TA0104A) koncový stupeň nemajú a ich výstupy fungujú ako „DRIVERY“, tj. budiče vonkajších výkonových spínacích tranzistorov, ktoré tak tvoria koncový stupeň výkonového zosilňovača. [2]

Výhody :

- veľmi vysoká účinnosť výkonového zosilňovača (okolo 90%)
- veľmi malé skreslenia
- možnosť dosiahnutia veľkých výstupných výkonov

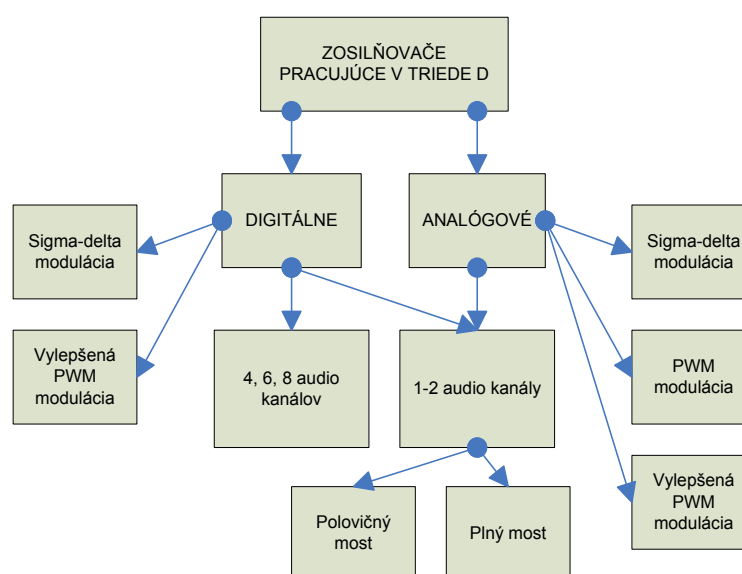
Nevýhody :

- bežne väčšie skreslenia, ako sa dosahuje so zosilňovačmi v triede A alebo AB

4 Zosilňovač triedy D

Zosilňovače ktoré pracujú v triede D, sa vyznačujú tým, že aktívne prvky ktoré obsahujú nepracujú v aktívnom režime. Tak isto ako aj u lineárnych zosilňovačov triedy A,B,AB, ktoré sa používajú pre konštrukciu nízkofrekvenčných zosilňovačov. Ich aktívne prvky sú spínané riadiacim signálom ktorý má vyššiu frekvenciu. Tento signál nesie informáciu o užitočnom signáli. Tým je možné u zosilňovačov tried D dosiahnuť vysokej účinnosti teoreticky 100% , v skutočnosti však 80-90%. Teoretickej účinnosti nie je možné dosiahnuť, pretože aktívne prvky nie sú ideálne. Majú nenulový odpor v zopnutom stave a ich spínací proces je taktiež bezstratový.

Ako sa už spomínalo v úvode, zosilňovače pracujúce v triede D nepatria medzi lineárne zosilňovače, pretože sa pri ich konštrukcii využíva modulácie signálu, najčastejšie impulzná šírková modulácia, označovaná tiež PWM (Pulse Width Modulation). V súčasnom čase existujú zosilňovače triedy D aj vo forme integrovaných obvodov, na ktorých výrobe sa podieľa celá rada výrobcov, napr. Texas Instruments, Analog devices a Maxim. Rozdelenie zosilňovačov v triede D je uvedené na obr.č. 4. Ako je z obr. č.4 zrejmé, zosilňovače pracujúce v triede D je možné deliť do 2 základných skupín. Prvú skupinu tvoria audio zosilňovače pracujúce v triede D, ktoré umožňujú priamo spracovať vstupný signál v digitálnej podobe. Pracovne tieto zosilňovače označme ako plne digitálne audio zosilňovače pracujúce v triede D. Do druhej skupiny patria výkonové audio zosilňovače pracujúce v triede D, na ktorých vstup je nutné priviesť analógový signál. Každá z uvedených skupín zosilňovačov má svoje výhodné aj menej výhodné vlastnosti, ktoré budú rozobrané v ďalších odstavoch. [1]



Obr. č.4: Základné rozdelenie zosilňovačov pracujúcich v triede D

Zosilňovače triedy D dnes nájdeme vo veľa komerčných zariadeniach, prevažne v zariadeniach mobilných. Konštruktéri tieto zosilňovače používajú hlavne vďaka ich vysokej účinnosti, čo je u zariadení ktoré sú napájané batériou veľmi výhodné. Ďalšou výhodou je, že zosilňovače triedy D potrebujú alebo vyžadujú oveľa menší chladič pre obvod stratového tepla. Niektoré zosilňovače triedy D dokonca vôbec nepotrebujú chladič. Napr. z dôvodu, že sú umiestnene do veľkého puzdra typu DIP.

Ďalšou výhodou sú ich kompaktné rozmery.

Nevýhodou zosilňovačov triedy D je nutnosť použitia výstupného filtra typu dolná priepust. Sú vyvinuté techniky pre spracovanie audio signálov, ktoré nevyžadujú použitie výstupného filtra ale musia byť splnené určité podmienky. U takýchto zapojení je predpokladané, že záťaž zosilňovača má silno induktívny charakter. Toto býva v praxi splnené napr. reproduktorom pretože reproduktor je vlastne cievka kmitajúca v magnetickom obvode. Ďalšou podmienkou by malo byť privedenie signálu k záťaži tleneným káblom o určitej dĺžky. Zosilňovače sú označované ako „filterless“.

Najrozšírenejšími triedami v nízkofrekvenčnej technike sú trieda A, trieda AB a dnes aj dosť používaná trieda D. U tried A a AB, pracujú tranzistory v lineárnej časti charakteristík na rozdiel od zosilňovača v triede D. Zosilňovač triedy D v bezporuchovom stave pracuje v režime spínacom. Vďaka tomu je u týchto zosilňovačov možné dosiahnuť veľmi vysokej účinnosti. Teoreticky dosahujú zosilňovače triedy D účinnosti 80 % a vyššie na rozdiel od hodnoty účinnosti zosilňovača triedy A ktorá je maximálne 50 %. V praxi je to ešte oveľa menej.

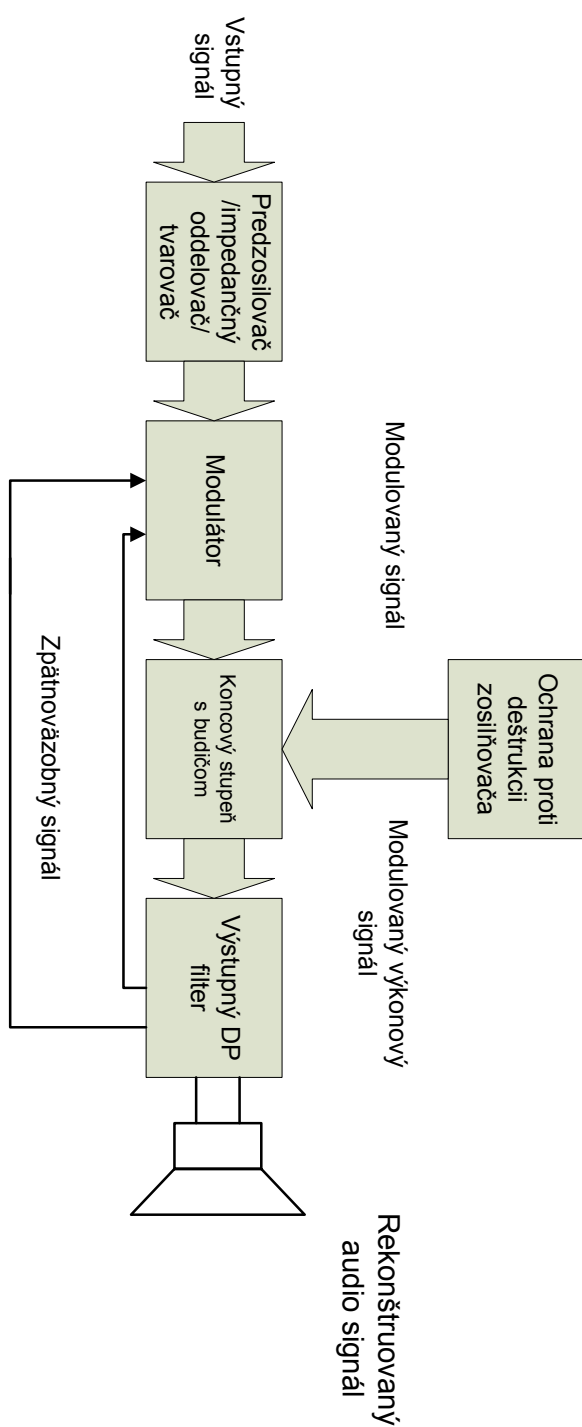
5 Všeobecné blokové schéma triedy D

Zhodným znakom pre obe skupiny zosilňovačov je ich principiálna bloková štruktúra zobrazená na obr. č.5. Táto uvedená bloková schéma je zhodná ako pre analógové tak aj pre plne digitálne výkonové audio zosilňovače pracujúce v triede D zostavené ako z diskretných súčiastok tak aj v prevedení jediného integrovaného obvodu. Je nutné ale poznamenať, že v topológii audio zosilňovačov často neexistuje pevná hranica, ktorú by bolo možné od seba presne oddeliť jednotlivé bloky, ako je tomu na obr. č.5.

Vstupný signál či už analógový alebo digitálny je obvykle privedený do bloku predzosilňovača / impedačného oddelovača / tvarovača. Tu je samozrejme možné (ak je potrebné) realizovať potrebné zosilnenie analógového vstupného signálu alebo regeneráciu vstupného digitálneho signálu. Tento blok, v štruktúre na obr. č.5 ako prvý zľava, obvykle taktiež realizuje impedančné oddelenie vlastného výkonového audio zosilňovača pracujúceho v triede D od zdroja signálu (Notebook, cd prehrávač, atď ...) . Ďalšou dôležitou časťou výkonového audio zosilňovača pracujúceho v triede D je blok modulátoru. Primárnu funkciu tohto bloku je prevod signálu do takej formy, akou je potom možné efektívne riadiť spínací proces tranzistorov v koncovom stupni zosilňovača.

Funkcia tranzistora v koncovom stupni je podobná spínaču, ktorý je striedavo v polohe zapnutý a rozopnutý. Pomer medzi dobou zopnutia a rozopnutia spínača riadi modulátor.

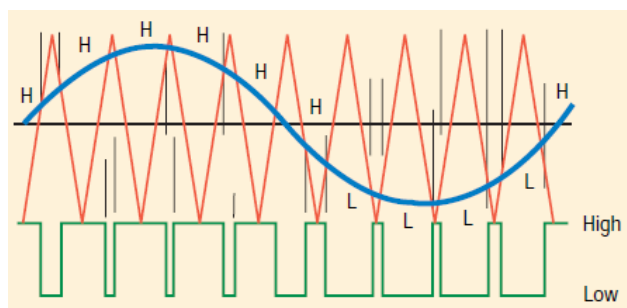
Užitočnú informáciu o audiosignáli nesie stredná hodnota výkonových impulzov na výstupe bloku koncového stupňa. Užitočný nízkofrekvenčný signál získame na výstupe tak, že zaradíme do cesty modulovanému výkonovému signálu filter typu dolná prepust'. Funkciou výstupného filteru je odstrániť nežiaduce vysokofrekvenčné spektrálne zložky, ktoré sú prítomné v modulovanom výkonovom signáli. [1] Všeobecné blokové schéma je zobrazené na obr.č.5.



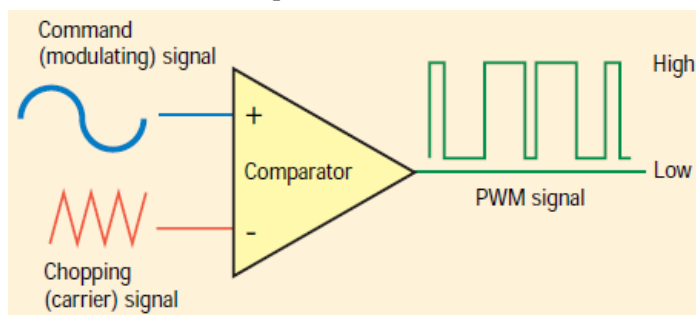
Obr.č.5 : Všeobecné blokové schéma zosilňovača triedy D

6 Impulzová šírková modulácia

Pulzná šírková modulácia, alebo PWM (Pulse Width Modulation) je diskretná modulácia pre prenos analógového signálu pomocou dvojhodnotového signálu. Ako dvojhodnotová veličina môže byť použité napr. napätie, prúd, alebo svetelný tok. Signál je prenášaný pomocou striedy. Pre demoduláciu takéhoto signálu potom stačí filter typu dolná prepust'. Vzhľadom k svojim vlastnostiam je PWM často využívaná vo výkonovej elektronike pre riadenie veľkosti napätia alebo prúdu. Princíp PWM modulácie spočíva v prenose strednej hodnoty signálu, jej veľkosti sa menia pomocou striedy, pričom strieda 50% odpovedá nulovej strednej hodnote. Strieda je časť jednej periódy, v ktorej sa nachádza signál v logickej 1.



Obr.č.6 Princíp PWM modulácie

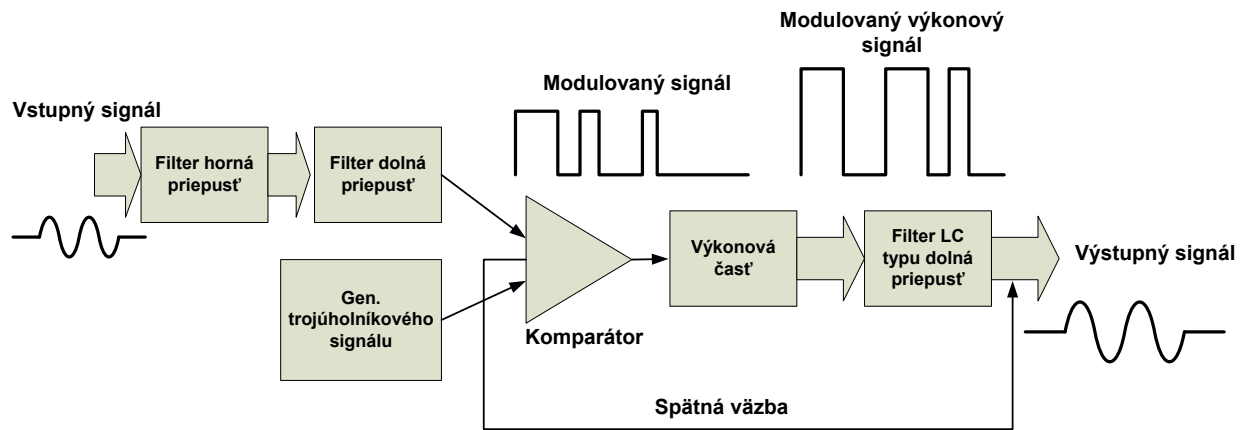


Obr.č.7 Funkcia komparátora

Pre kvalitnú PWM moduláciu je dôležité:

- kvalitný generátor trojuholníkového alebo pílovitého signálu
- veľká rýchlosť komparátoru
- stabilné napájacie napätie
- minimálna impedančné alebo odporové zaťaženie výstupu komparátoru

7 Bloková schéma zosilňovača a návrh blokov



Obr.č.8 Blokové schéma zosilňovača triedy D

7.1 Návrh filtru typu horná prepust'

Filter typu horná prepust' prepúšťa signály od meznej frekvencie f_{\min} a nižšie frekvencie potláča.

Pri návrhu vstupného filtru typu horná prepust' sa vychádzalo z požadovaných parametrov filtru:

- Typ filtru ARC 1. rádu
- Mezná frekvencia 5 Hz
- Butterworthova aproximácia

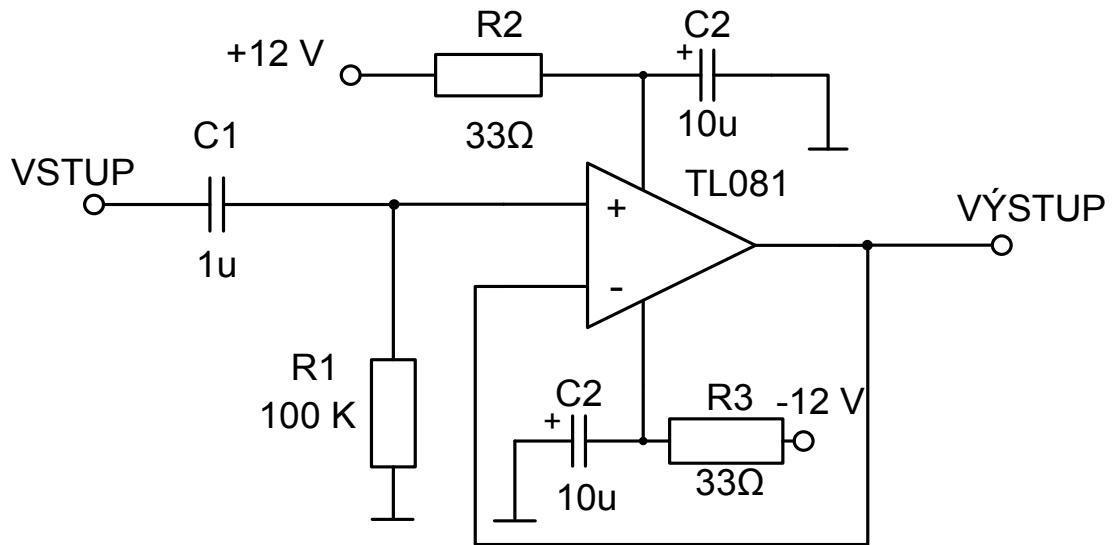
Pri použití Butterworthovej aproximácie dôjde na meznej frekvencii pokles signálu o 3dB.

Od meznej frekvencie signál klesá v závislosti na ráde filtra.

U 1. rádu klesá signál s útlmom 6 dB/oktávu.

7.1.1 Schéma zapojenia filtra typu horná prepust'

Pri návrhu tohto filtra som vychádzal zo zapojenia z literatúry[3] . V tomto filtri som použil operačný zosilňovač TL081. Vybral som ho pretože má vlastnosť nízkeho šumu a má vysoký tranzitný kmitočet 4MHz. Napájanie operačného zosilňovača TL081 je symetrických ± 12 V.



Obr.č.9: Zapojenie filtra typu horná prepust'

7.1.2 Výpočet hodnôt súčiastok filtra typu horná prepust'

Hodnota odporu bola zadaná $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Podľa vzorca (1) vypočítame hodnotu kapacity kondenzátoru.

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} [F, \text{HZ}, \Omega] \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10000} = 3,218 \text{ } \mu\text{F}$$

Vzhľadom k vypočítanej hodnote kondenzátoru som zvolil kapacitu kondenzátoru $C_1 = 3,3 \text{ } \mu\text{F}$. Hodnota bola zvolená podľa rady E6.

Zmena kapacity v porovnaní k vypočítanej hodnote kondenzátora má za následok to , že sa posunie mezný kmitočet. Tento upravený kmitočet vypočítame podľa vzťahu (2).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_1} [Hz, F, \Omega]$$
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} = 0,3 Hz \quad (2)$$

Mezný kmitočet sa teda oproti zadanému kmitočtu (5Hz) posunul na hodnotu 0,3 Hz.

7.2 Návrh filtra typu dolná prepust'

Filter typu dolná prepust' prepúšťa signály po meznú frekvenciu f_{\max} a vyššie frekvencie ako f_{\max} potláča.

Pri návrhu vstupných filtrov typu dolná prepust' sa vychádzalo z požadovaných parametrov filtra:

- Typ filtra ARC 2 a 4. rádu
- Mezná frekvencia 22.000 Hz
- Butterworthova aproximácia

Pri použití Butterworthovej aproximácie dôjde na meznú frekvenciu pokles signálu o 3dB.

Od meznú frekvenciu signál klesá v závislosti na ráde filtra. U 1. rádu klesá signál s útlmom 6 dB/oktávu. U 2. rádu klesá signál s útlmom 12 dB/oktávu a u filtra 4. rádu klesá signál s útlmom 24 dB/oktávu. Pri návrhu filtra som opäť použil operačný zosilňovač TL081 s napájaním $\pm 12 V$.

7.2.1 Filter typu dolná prepust' 1.rádu

Výpočet hodnôt súčiastok pre filter DP 1.rádu:

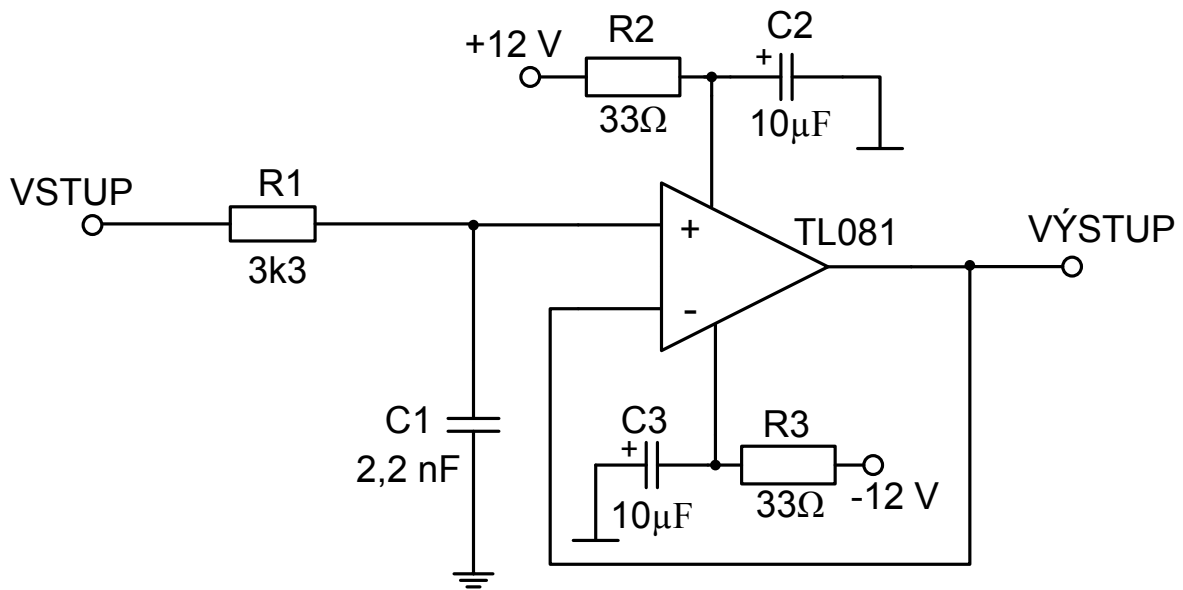
Hodnota kondenzátoru zvolená na 2,2 nF.

Výpočet hodnoty rezistora (3):

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C} [\Omega, Hz, F]$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 22000 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}} = 3288 \Omega$$
(3)

Odpor R bol zvolený podľa rady E12 na hodnotu 3k3. Výsledné zapojenie filtra dolná prepust' 1.rádu vidíme na obr.č.10.



Obr.č.10: Schéma zapojenia filtra typu dolná prepust' 1.rádu

7.2.2 Filter typu dolná prepust' 2.rádu

Najprv bola zvolená hodnota kondenzátoru $C_A = C_1 = 2,2 \text{ nF}$. Táto hodnota sa použila pre ďalšie výpočty hodnôt rezistorov (4).

$$R = \frac{1,414}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_A} [\Omega, Hz, F]$$

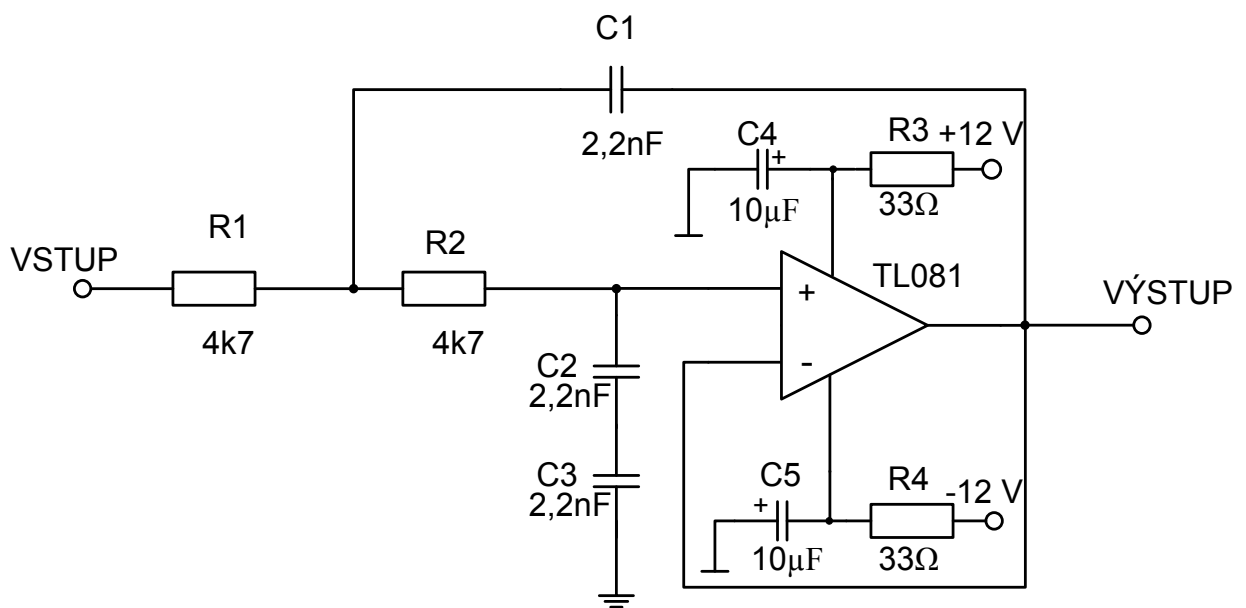
$$R = \frac{1,414}{2\pi \cdot 22000 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}} = \frac{1,414}{3,04 \cdot 10^{-4}} = 4649,69 \Omega$$
(4)

Vypočítala sa hodnota , pomocou ktorej sa následne vypočíta hodnota kondenzátoru C_B .

$$C_B = \frac{0,7071}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} [F, Hz, \Omega]$$

$$C_B = \frac{0,7071}{2\pi \cdot 22000 \cdot 4649} = 1,1 nF \quad (5)$$

Odpor R je zvolený podľa rady E12 na hodnotu 4k7. kondenzátor C_B je navrhnutý ako sériová kombinácia kondenzátorov $C_2 = 2,2 \text{ nF}$ podľa vzťahu (5). Schému zapojenia vidíme na obr.č.(11). Výpočty boli použité z literatúry [3] .



Obr.č.11: Schéma zapojenia filteru typu dolná prepust' 2.rádu

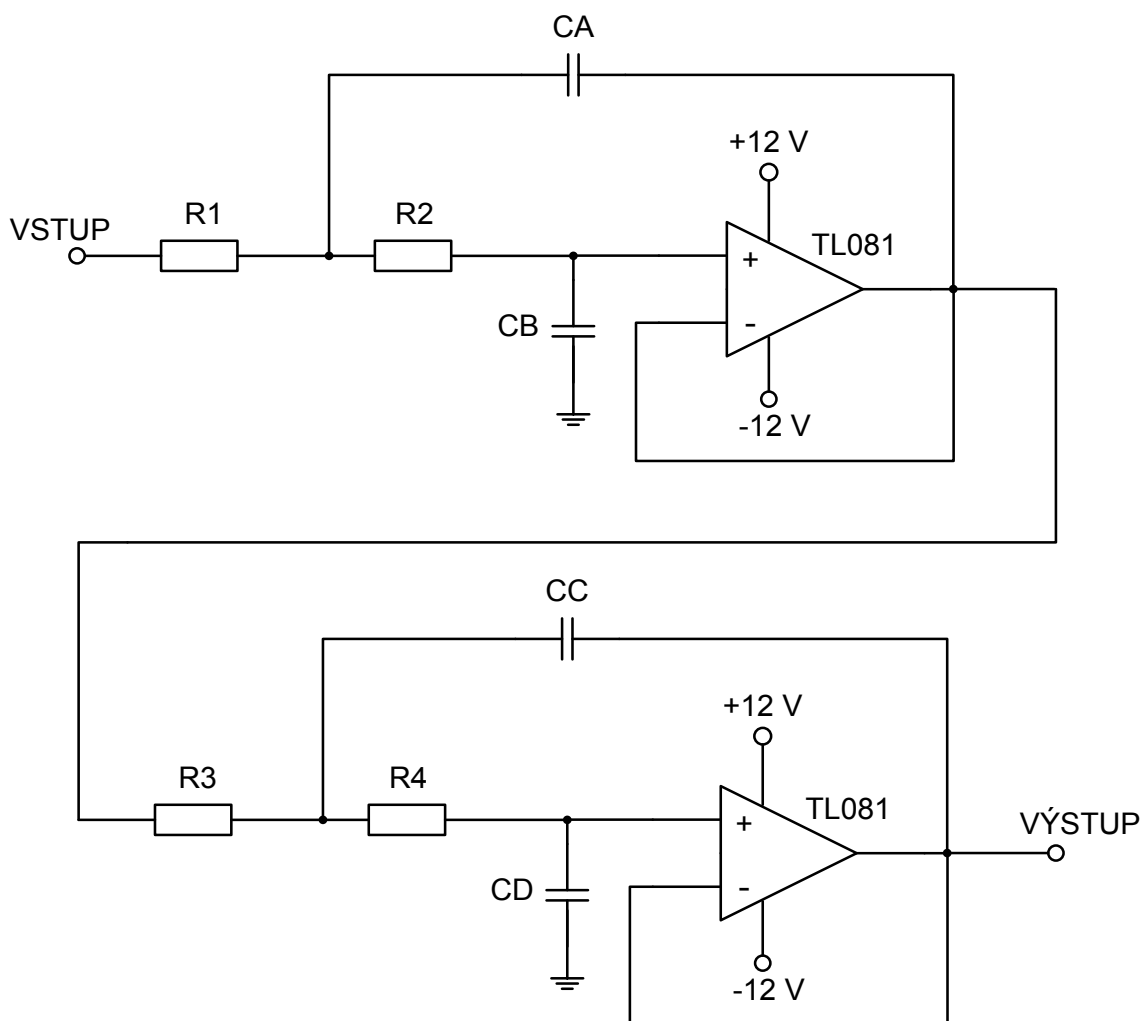
7.2.3 Filter typu dolná prepust' 4.rádu

Pre realizáciu filteru typu dolná prepust' 4 rádu som použil kaskádne zapojenie 2 filterov typu dolná prepust' 2.rádu. Hodnoty súčiastok boli počítané pre všeobecné zapojenie obr.č.12.

Prvým krokom bolo zvolenie hodnoty kondenzátoru $C_A = C_1 = 2,2 \text{ nF}$. Z tejto hodnoty sa vypočítali hodnoty rezistora a kondenzátora.

$$R = \frac{1,0824}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_A} [\Omega, Hz, F]$$

$$R = \frac{1,0824}{2\pi \cdot 22000 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}} = \frac{1,0824}{3,04 \cdot 10^{-4}} = 3559,28 \Omega \quad (6)$$



Obr.č.12: Všeobecné schéma zapojenia filtra typu dolná prepust' 4.rádu

S vypočítanou hodnotou rezistora sa ďalej vypočítala hodnota kondenzátoru C_B , C_C a C_D .

$$C_B = \frac{0,9239}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} [F, Hz, \Omega]$$

$$C_B = \frac{0,9239}{2\pi \cdot 22000 \cdot 3559} = 1,88 nF \quad (7)$$

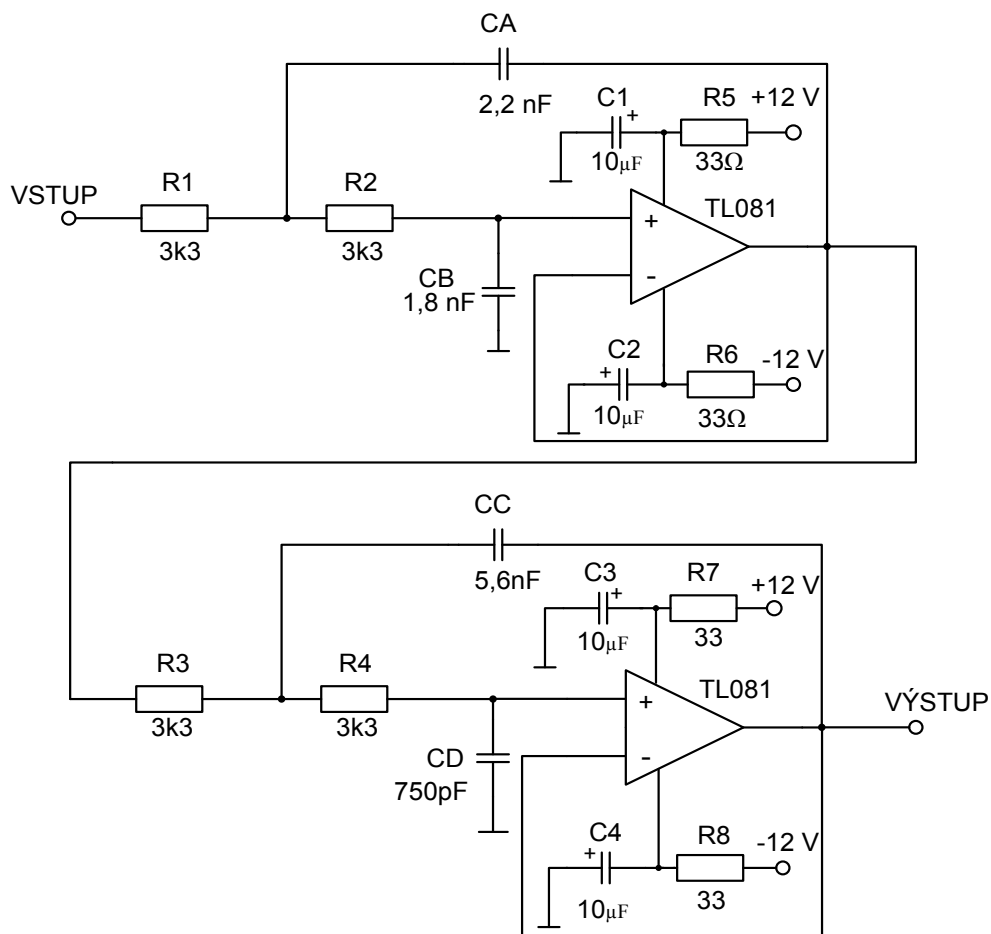
$$C_C = \frac{2,6130}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} [F, Hz, \Omega]$$

$$C_C = \frac{2,6130}{2\pi \cdot 22000 \cdot 3559} = 5,31 \text{ nF}$$
(8)

$$C_D = \frac{0,3827}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} [F, Hz, \Omega]$$

$$C_D = \frac{0,3827}{2\pi \cdot 22000 \cdot 3559} = 0,778 \text{ nF}$$
(9)

Hodnotu odporu som zvolil z rady E12 na hodnotu 3k3. Kondenzátor C_B som zvolil z rady E12 na hodnotu 1,8 nF. Kondenzátor C_C som tak isto zvolil z rady E12 a to na hodnotu najbližšie k vypočítanej hodnote a to 5,6 nF. Kondenzátor C_D som zvolil z rady E24 na hodnotu 750 pF. Pri výpočte týchto hodnôt sa vychádzalo z literatúry [3].



Obr.č.13: Schéma zapojenia filtra typu dolná prepust' 4.rádu

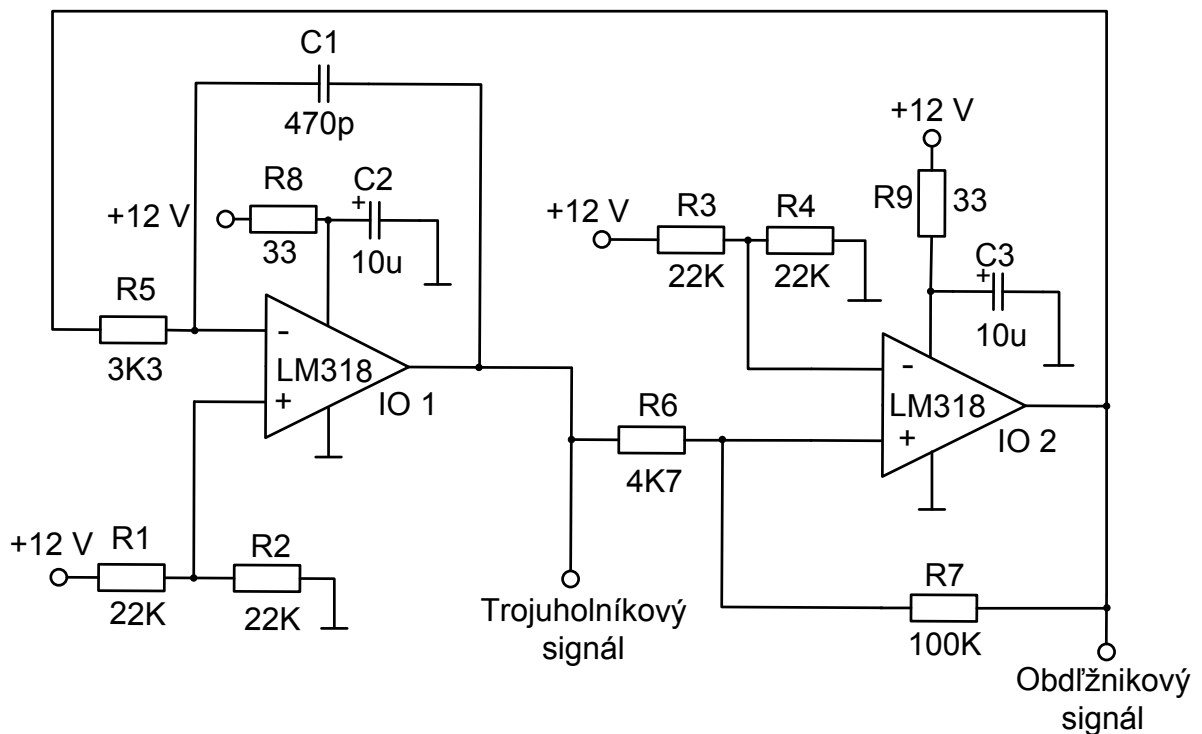
7.3 Návrh generátoru trojuholníkového signálu

V generátore sa generuje signál trojuholníkového tvaru, ktorý slúži k modulácii signálu. K vytvoreniu PWM modulácie je potrebný trojuholníkový signál, ktorý sa porovnáva so zvukovým signálom. Pretože na kvalite tohto trojuholníka závisí celková kvalita výstupného signálu zosilňovača, musí byť veľmi kvalitný, musí mať ostré zlomy, výbornú linearitu, čistotu a konštantný rozkmit. Základný spôsob, ako vyrobiť trojuholník, je pomocou integrátora s operačným zosilňovačom a komparátoru s hysterezou. Schéma generátoru trojuholníkového signálu je na obr.č.14.

Napájanie tohto zapojenia je nesymetrických 12 V, preto musí byť umelá zem (polovica napájacieho napätia) vytvorená z odporov R_1 , R_2 , R_3 , a R_4 . IO_1 je zapojený ako integrátor a IO_2 v tomto obvode slúži ako komparátor s hysterezou. Ak je napätie U_1 na výstupe komparátoru $U_{cc} = 12$ V, integrátor s IO_1 napätie integruje smerom k 0. Ako náhle dosiahne napätie U_2 na výstupe integrátora zlomovej úrovne, komparátor sa preklopí a na výstupe má hodnotu 0V. Napätie sa na IO_1 integruje smerom nahor a ako náhle dosiahne prahovej úrovne, komparátor sa opäť preklopí na U_{cc} a dej sa znova opakuje. [5]

Ako vhodný spínací kmitočet som zvolil 250 kHz. V prvom rade splňuje Shannon – Kotelníkov teorém a ďalej je to kompromis medzi jednoduchým odfiltrovaním kmitočtu a zložitost'oi zapojenia a technickými možnosťami u nás dostupných súčiastok.

Po dlhom hľadaní a zisťovaní parametrov som za vhodné operačné zosilňovače zvolil LM318. A to viacmenej vďaka ich veľkej rýchlosti priebehu, ktorá je 50V/μs. Maximálne napätie tohto IO je ± 20 V a maximálne napätie na diff. Vstupoch môže byť len ± 15 V. Kondenzátory C_2 a C_3 slúžia ako blokovacie kondenzátory, pretože spínanie komparátoru by spôsobovalo veľké napäťové záporné aj kladné špičky. Ďalej kondenzátor C_1 by mal byť fóliový, kôli dlhodobej stabilite a malej závislosti kapacity na teplote (± 1%). Priebeh výstupného napätia generátoru je na obr.č.14.



Obr.č.14: Generátor trojuholníkového signálu

7.4 Návrh komparátoru

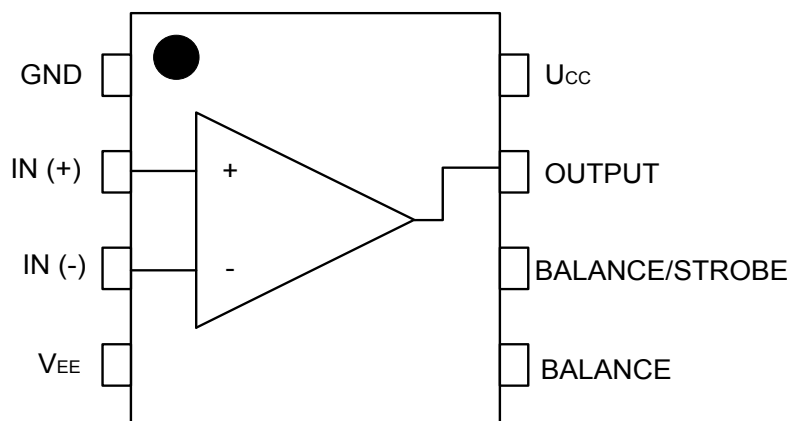
Komparátor je jednoduchý obvod, ktorý nám porovnáva dve napätia a podľa ich rozdielu je na výstupe buď hodnota logickej 0 alebo 1. Každú zmenu veličiny (prúd, odpor, rýchlosť...), ktorú dokážeme previesť na zmenu napätia, môžeme pomocou komparátora zachytiť a vhodne využiť. Indikovať prekročenie napätia, pokles napätia, rôzne ochrany, regulácie a podobne.

Pri voľbe komparátoru je kladený hlavne dôraz na jeho dôležitú vlastnosť a to je rýchlosť. Ako vhodný komparátor som zvolil obvod LM311. Jeho čas odozvy je 200ns. Je to komparátor v puzdre DIP8 čo znamená, že obsahuje 8 vývodov. Rozloženie vývodov je uvedené na obr.č.15.

V bloku komparátora sa vytvára impulzový šírkový signál, ktorý je tvorený z 2 signálov:

- vstupný analógový signál
- trojuholníkový signál

7.4.1 Rozloženie vývodov obvodu LM311

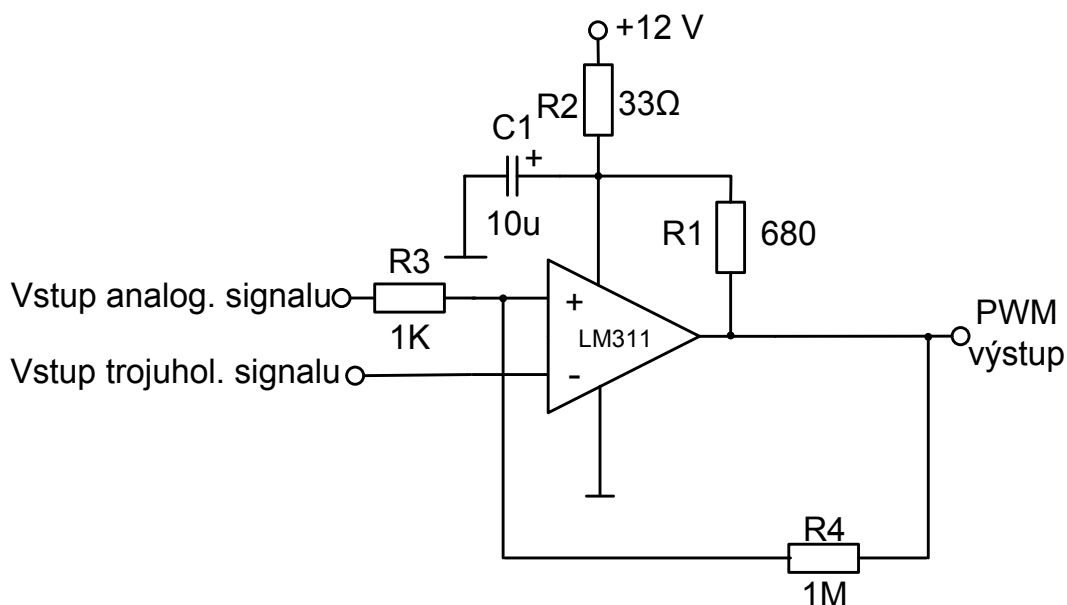


Obr.č.15: Vnútorné blokové schéma obvodu LM311 a rozloženie vývodov

Parameter	Symbol	Value	Unit
Total Supply Voltage	VCC	36	V
Output to Negative Supply Voltage LM311	VO - VEE	40	V
Ground to Negative voltage	VEE	-30	V
Differential Input Voltage	VI(DIFF)	30	V
Input Voltage	VI	±15	V
Output Short Circuit Duration	-	10	sec
Power Dissipation	PD	500	mW
Operating Temperature Range	TOPR	0 ~ +70	°C
Storage Temperature Range	TSTG	- 65 ~ +150	°C

Tab.č.1 Parametre obvodu LM311

7.4.2 Schéma zapojenia komparátoru



Obr. č. 16: Zapojenie komparátoru s použitím LM311

7.5 Návrh výkonovej časti zosilňovača triedy D

Blok výkonovej časti sa skladá z budiča MOSFET tranzistorov. Vstupným signálom je impulzne modulovaný signál, ktorý pomocou MOSFET tranzistorov zosilňuje na požadovanú úroveň.

Pri návrhu sa musela vyriešiť otázka zvolenia vhodného budiča MOSFET tranzistorov. Pri spínaní zosilňovačov sa používa mostíkové alebo polo - mostíkové zapojenie. MOSFET tranzistory potrebujú budiče, ktoré dokážu impulzne dodať veľký prúd. Budiče sa vyrábajú ako integrované obvody ale dajú sa vyrobiť aj použitím diskretných súčiastok. Existujú dva druhy budičov. Budiče ktoré slúžia k spínaní horného MOSFETu v polomoste a budiče ktoré slúžia pre spínanie dolného MOSFETu v polomoste.

7.5.1 Riadenie výkonových MOSFET tranzistorov

Úlohou budiaceho obvodu výkonových MOSFET tranzistorov je spínať a rozopínať koncové unipolárne tranzistory. Na budiace obvody sú kladené nasledujúce základné požiadavky.

- Malý dynamický odpor budiaceho obvodu
 - Veľmi malý kľudový prúd tečúci obvodom v neaktívnom stave
 - „plávajúca“ činnosť výkonových spínacích tranzistorov
 - Kompaktná konštrukcia s čo možno najväčšou snahou eliminovať nežiaduce indukčnosti medzi spojmi
 - Galvanické oddelenie riadiaceho obvodu a obvodu budiča výkonového tranzistora MOSFET
- Medzi typické zapojenia, často využívaných pre riadenie výkonových tranzistorov MOSFET

platí:

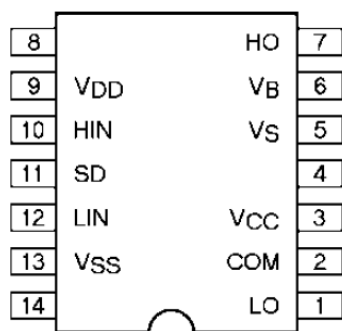
- Komplementárny emitorový sledovač ako budič MOSFET tranzistorov
- Využitie impulzného transformátora pre riadenie MOSFET tranzistorov
- Použitie integrovaných budičov tranzistorov MOSFET
- Integrované obvody „power stage“ – kombinácia budiča a výkonových tranzistorov v jednom puzdre.

Integrovanými budičmi tranzistorov MOSFET je možné riadiť jeden či viac unipolárnych tranzistorov MOSFET s indukovaným kanálom typu N alebo P, prípadne i kombináciu oboch typov.

[6]

7.5.2 Budič výkonových MOSFET tranzistorov

Pre teoretickú konštrukciu výkonovej časti som použil budiče v podobe integrovaného obvodu IR2213 ktorý vyrába firma International Rectifier. Obvod IR2213 obsahuje high a low side budič tranzistorov zapojených do polovičného mosta. Obvod sa vyrába v puzdre DIP14 tzn. že obsahuje 14 vývodov. Prehľad vývodov je vidieť na obr.č.17.



Obr.č.17: Označené vývody IO IR2213

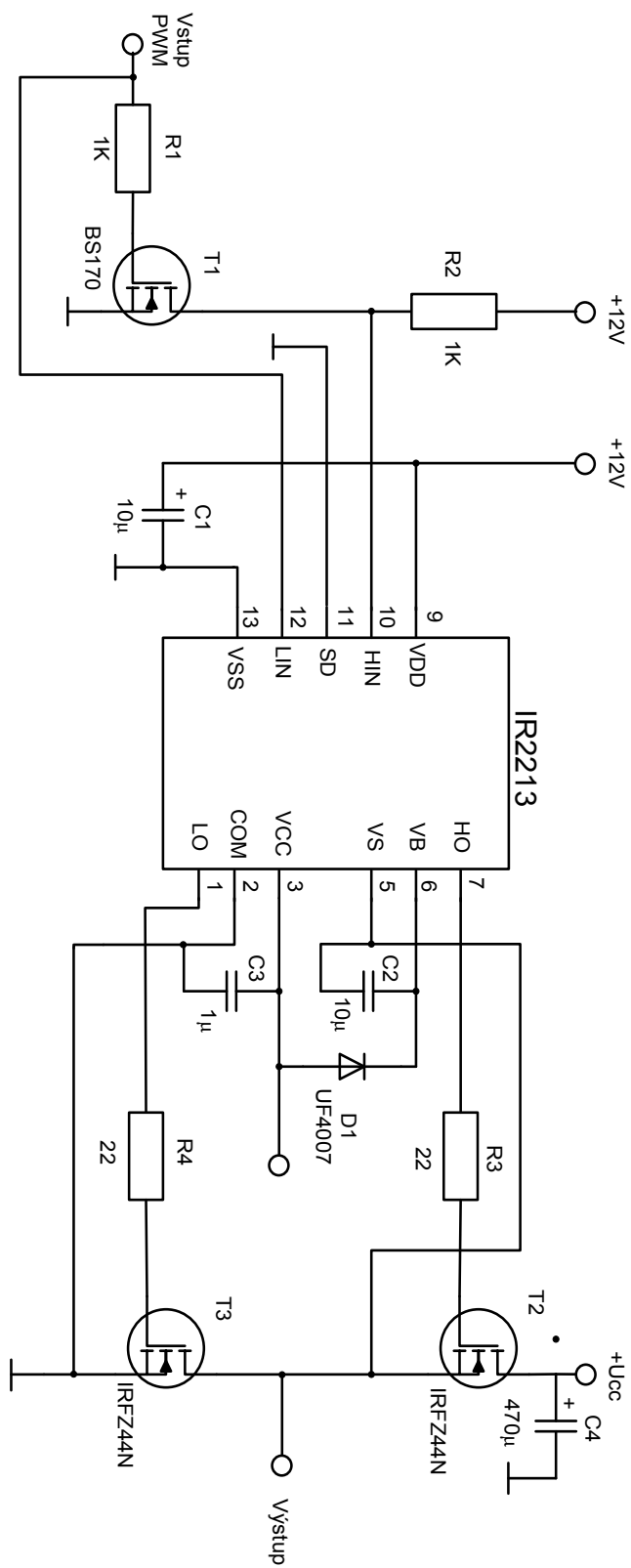
Symbol	Popis
VDD	Logický vstup
HIN	Logický vstup pre high side budič (HO)
SD	Logický vstup pre vypnutie
LIN	Logický vstup pre low side budič (LO)
VSS	Logická zem
VB	Plávajúce napätie pre high side
HO	Výstup High side
VS	Zem pre high side budič
Vcc	Napájacie napätie low side
LO	Výstup low side
COM	Zem low side

Tab.č.2 Popis a funkcie vývodov IO IR2213

Použitý obvod IR2213 môže pracovať na princípe bootstrap kondenzátoru, obsahuje ale aj prvky pre oneskorenie spínania jednotlivých výkonových tranzistorov, čím sa zamedzí aby sa súčasne zopnutie oboch tranzistorov v polovičnom moste. Tento stav my nepotrebujeme, pretože znižuje účinnosť zosilňovača.

Na obr.č.18 je zapojenie obvodu IR2213. PWM signál je privedený rovno na logický vstup pre low side budič (LIN). Na vstup (HIN) je privedený signál z tranzistora T_1 . Tento signál je integrovaný to zabezpečí tranzistor T_1 . Ako som spomínal obvod môže pracovať ako bootstrap kondenzátor. V obvode túto funkciu zastáva kondenzátor C_2 . Kondenzátor sa nabíja cez diódu D_1 . Na pin VDD je privedené napájacie napätie +12 V. Pin VSS, SD je pripojený na zem. Pin LO je privedený cez rezistor R_4 na gate výkonového tranzistora T_3 a pin HO je privedený cez rezistor R_3 na gate výkonového tranzistoru T_2 . Zvolené tranzistory sú rovnaké

a to s označením IRFZ44N. Kondenzátory C_1 , C_2 , C_4 a C_5 súžia v obvode na blokovanie napätových špičiek.



Obr.č.18: Zapojenie IO IR2213

7.6 Návrh výstupného LC filtra typu dolná prepust'

V bloku tohto LC filtra sa vytvára zo zosilneného impulzne modulovaného signálu analógový zosilnený signál, ktorý svojim priebehom odpovedá signálu, ktorý vstupuje do bloku modulátoru. LC filter typu dolná priepust sa takmer výhradne používa pre potlačenie nežiaducich vysokofrekvenčných spektrálnych zložiek na výstupoch výkonových zosilňovačov pracujúcich v triede D. Účinnosť zosilňovača a jeho audio parametre sú ovplyvnené voľbou komponentov pre jeho realizáciu.

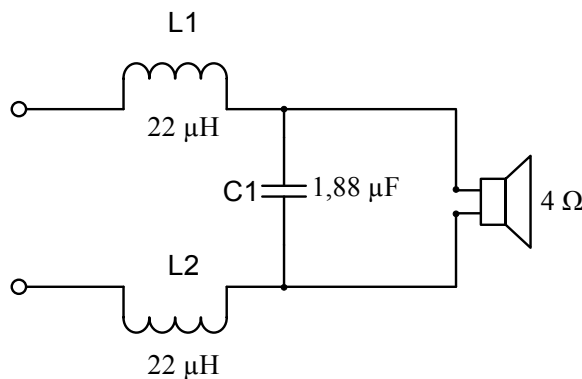
- Feristor a kondenzátor
- Výstup zosilňovača bez výstupného filtra
- Filter typu dolná priepust tvorený prvkami L a C

Ako výstupný filter bol zvolený filter typu dolná priepust 2. rádu. Filter je tvorený prvkami L a C s Butterworthovou aproximáciou. Lomová frekvencia je zvolená na hodnotu 25KHz. Ako výstupná záťaž R_Z je zvolená hodnota 4 Ω . Teoretické hodnoty súčiastok sa vypočítajú podľa vzťahov (10) a (11)

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot R_Z \cdot f_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^3} = 1,13 \mu F \quad (10)$$

$$L_{1,2} = \frac{\sqrt{2} \cdot R_Z}{4 \cdot \pi \cdot f_C} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^3} = 18 \mu H \quad (11)$$

Vypočítané hodnoty súčiastok je potrebné zaokrúhliť na normalizované hodnoty. Hodnota kapacity kondenzátora C je 1,88 μF a hodnota indukčnosti cievky $L_{1,2}$ je zvolená na 22 μH pre mostíkové zapojenie. [6]

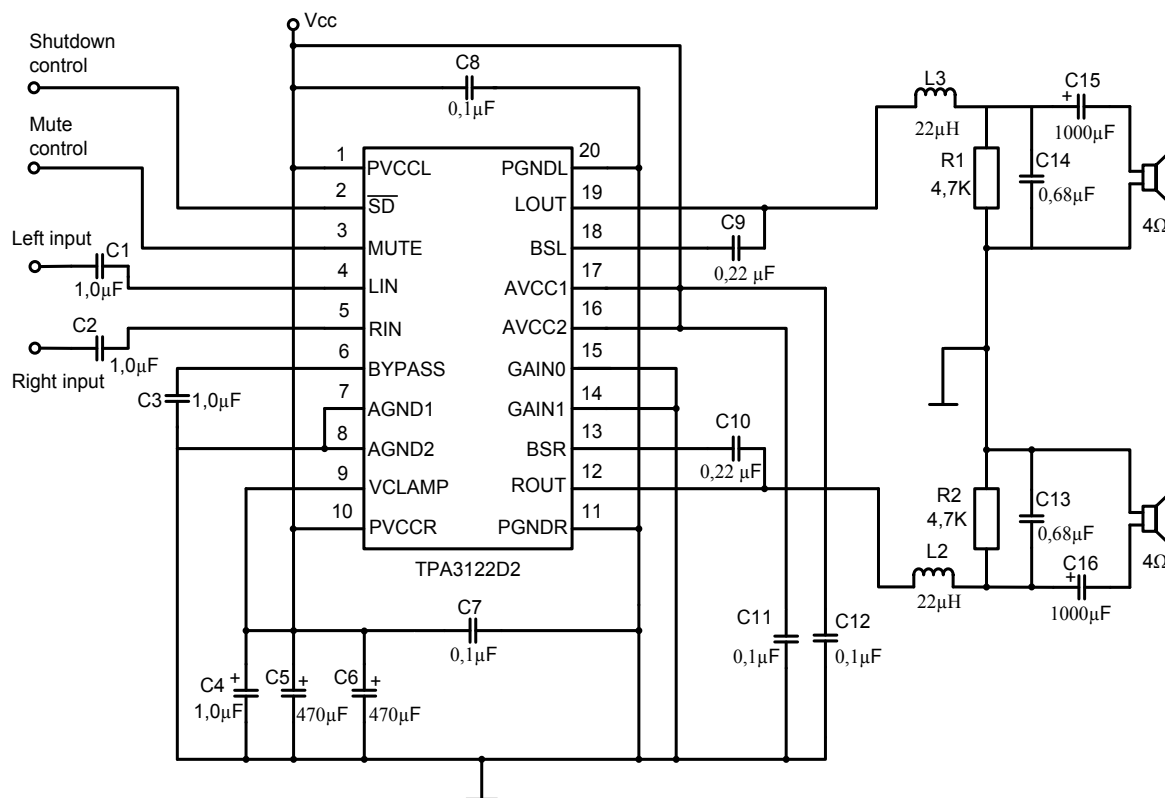


Obr.č.19: Výstupný filter dolná prepust' 2. rádu

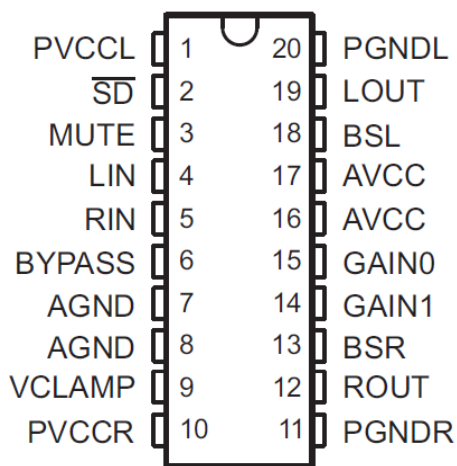
8 Obvod TPA3122D2

Prednosťou integrovaného obvodu TPA3122D2 je, že ako jeden z mála integrovaných obvodov výkonových zosilňovačov v triede D je zapuzdrený do puzdra typu DIP. Ide teda o pomerne veľké puzdro v zrovnaní s inými integrovanými obvody tohto typu a očakávajú sa menšie nároky na chladenie takéhoto obvodu. Audio zosilňovač je koncipovaný ako stereofónny zosilňovač o výstupnom výkone 15 W na kanál pri 10% THD+N skreslení signálu. Tento údaj je trochu scestný, pretože skreslenie 10% THD+N je veľmi vysoké a pri poslúchaní je toto skreslenie nepríjemné. Z charakteristík, ktoré sú uvedené v katalógovom liste tohto zosilňovača je zrejmé, že závislosť skreslenia THD+N na výstupnom výkone je závislé na napájacom napätí. Napríklad pre zosilnenie nastavené na 20 dB, záťaž 4 Ω a napájacie napätie 24 V je možné pri skreslení pod 1 % získať výstupný výkon viac ako 10W.

Riadenie zosilnenia tohto zosilňovača je vykonávané pomocou 2 vývodov na puzdre, ktoré sú označené ako GAIN0 a GAIN1. Takže zosilnenie sa môže riadiť v 4 pevne daných krokoch, ktoré sú podľa katalógového listu 20,26,32,36 dB. Vnútorňý oscilátor je pevne nastavený na 250 kHz \pm 20kHz. TPA3122D2 obsahuje tepelnú ochranu s pevne nastavenou teplotou na 150°. Ak teplota obvodu dosiahne tejto úrovne, obvod sa automaticky prepne do režimu shutdown a výstupy zosilňovača sa odpoja. Ak teplota obvodu klesne o 30° obvod znova obnoví svoje funkcie. Ďalšia ochrana ktorú obvod má je ochrana proti skratu výstupného obvodu. Schému zapojenia vidíme na obr.č.20.[7]



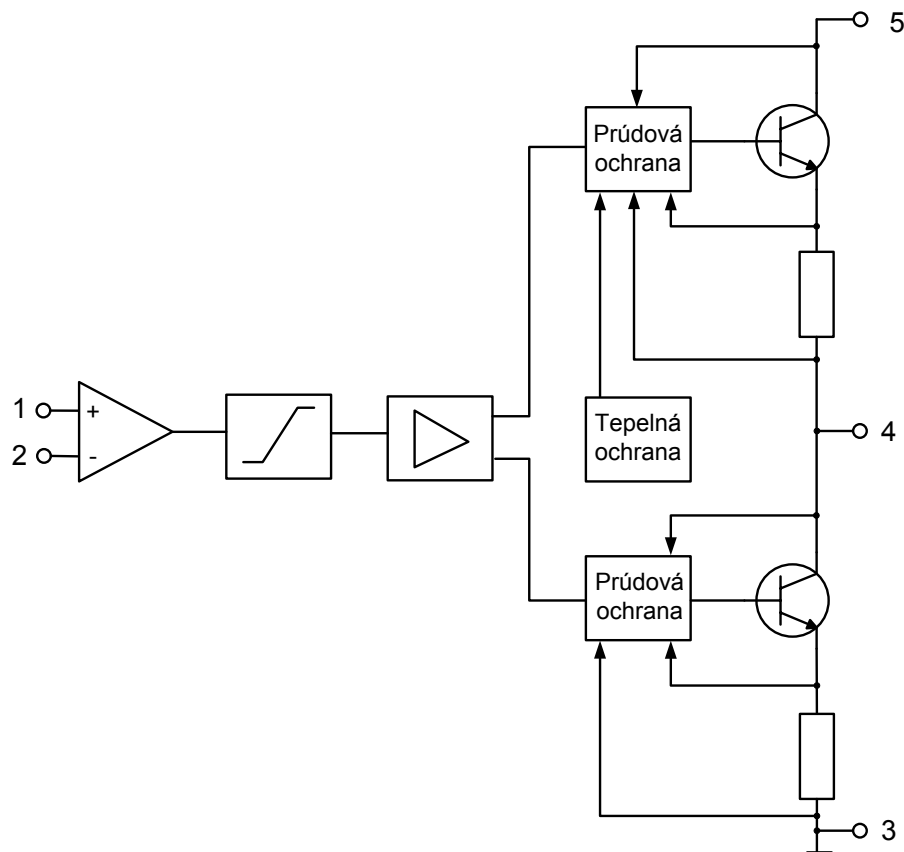
Obr.č.20: Schéma zapojenia obvodu TPA3122D2



Obr.č.21: Označenie vývodov IO TPA3122D2

9 Zosilňovač triedy AB s IO TDA2030

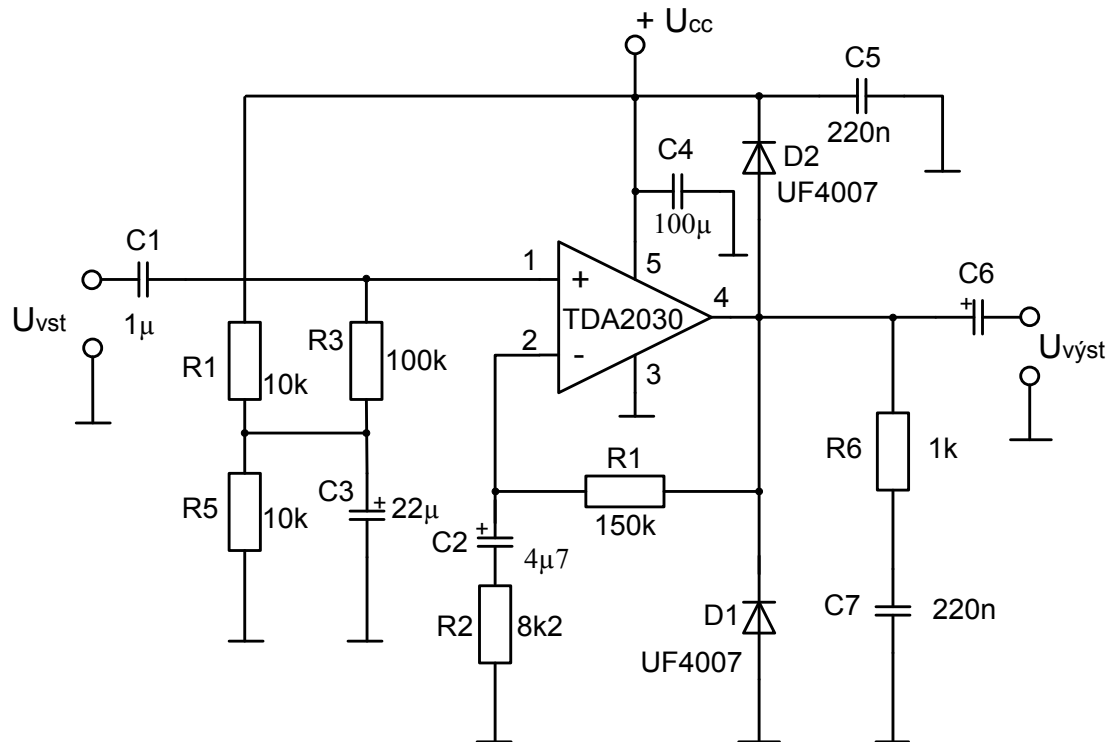
Integrovaný obvod TDA2030 je koncový nízkočfrekvenčný zosilňovač s maximálnym celkovým stratovým výkonom 20W a maximálnym napájacím napätím ± 18 V. Blokové schéma vnútorného zapojenia obvodu je na obr. č.:22.



Obr.č.22: Blokové schéma zapojenia IO TDA 2030

Za vstupným diferenciálnym zosilňovačom je zapojený obmedzovací stupeň, ktorý v obvode zabráňuje prebudeniu budiča koncového stupňa zosilňovača. To že nám obvod pracuje v bezpečnostnom pracovnom rozsahu zabezpečujú ochranné obvody proti tepelnému a prúdovému preťaženiu. Obvod s nadprúdovou ochranou reaguje iba na striedavý signál.

Obvod je zapuzdrený do puzdra TO-220 pre zvislú montáž. Základné doporučené zapojenie obvodu TDA2030 pre nesymetrické napájacie napätie je na obr.č.23.



Obr.č.23: Základné zapojenie nf zosilňovača s IO TDA2030

Pri nesymetrickom napájacom napätí je nutné nastaviť jednosmerné pracovný bod zosilňovača vonkajším deličom napätia na vývode 1 IO. Pri uzatvorenej slučke spätnej väzby platí, že rozdiel jednosmerných napätí medzi vývodmi 1 a 2 ale aj medzi vývodmi 1 a 4 IO je nulový.

V uvedenom príklade zapojenia bude teda na výstupe zosilňovača jednosmerné napätie rovné polovici napájacieho napätia. Pre dosiahnutie dobrého potlačenia brumu vo výstupnom signáli je nutné jednosmerné vstupné napätie tvorené deličom dobre prefiltrovať kondenzátorom C_3 . Napäťové zosilnenie je nastavené odpormi R_1 a R_2 v spätnej väzbe. Platí pomer:

$$A_U = U_{vyst} / U_{vst} = 1 + R_1 / R_2$$

Dolný medzný kmitočet zosilňovača je určený vstupným RC článkom, ktorý je tvorený R_3 a C_1 a článkom RC v spätnej väzbe R_2 a C_2 . Pre tieto medzné kmitočty platí :

$$f_d = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot C_1)$$

prípadne:

$$f_d = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2)$$

Diódy D_1 a D_2 na vývode 4 integrovaného obvodu chránia výstup zosilňovača pred indukčnými napäťovými špičkami, ktoré vznikajú napr. pri pripojení a odpojení reproduktora. Zisk zosilňovača je určený rezistormi R_1 a R_2 v obvode zápornej spätnej väzby.

10 Namerané a vypočítané hodnoty zosilňovačov triedy D a AB

Táto kapitola sa zaoberá preverením vlastností realizovaného zapojenia zosilňovača pracujúceho v triede D s porovnaním s nameranými vlastnosťami zosilňovača pracujúceho v triede AB. Zosilňovač sa dá vo všeobecnosti urobiť zo súčiastok nízkej integrácie tzn OZ , rezistory kondenzátory. Ale dá sa vytvoriť aj pomocou integrovaného obvodu. Toto navrhnuté zapojenie som nahradil iným zapojením ktoré je realizované spomínaným obvodom. Výhodou je to že všetky časti ktoré som popisoval sa nachádzajú v jednom puzdre. Realizácia zosilňovača je vykonaná na nepájavom kontaktnom poli. A z tohto dôvodu som sa rozhodol využiť tento obvod , pretože je to vhodnejšie riešenie z toho dôvodu, že pri množstve súčiastok ktoré by sa nachádzali na kontaktnom poli by zapríčinilo nepresné merania. Pre meranie parametrov zosilňovača triedy D , som sa rozhodol použiť obvod TPA3122D2. Vlastnosti tohto obvodu boli popísané v kapitole 8.

10.1 Zosilňovač triedy D s IO TPA3122D2

10.1.1 Výpočet účinnosti

Preverenie vlastností zosilňovača triedy D s IO TPA3122D2 bolo prevedené na nepájavom kontaktnom poli podľa schémy zapojenia obr.č.20. Ako výstupná záťaž bola zvolená záťaž $2 \times 4\Omega$. Obvod je napájaný hodnotou $U_{cc} = 12\text{ V}$. Obvod odoberá bez pripojenia záťaže kludový prúd 30,6 mA. Vstupná frekvencia je nastavená na hodnote 1 kHz. Spínacia frekvencia obvodu TPA3122D2 je 244 kHz.

Po pripojení záťaže na oba kanále hodnotou 4Ω sa hodnota odoberaného prúdu zvýšila na hodnotu 630 mA. Výstupný výkon vypočítame podľa vzťahu (12).

$$P_{VYST} = \frac{U_{VYST}^2}{R_Z} = \frac{3,4^2}{4} = 2,89\text{ W} \quad (12)$$

Príkon sa vypočíta z napájacieho napätia a odoberaného prúdu podľa vzťahu (13).

$$P = 12 \cdot 0,630 = 7,56\text{ W}. \quad (13)$$

Následne vypočítame účinnosť zosilňovača podľa vzťahu (14).

$$\eta = \frac{2 \cdot P_{\text{vyst}}}{P} = \frac{2 \cdot 2,89}{7,56} = 0,76 = 76\% \quad (14)$$

Podľa hodnôt nameraných a vypočítaných nám vyšla výsledná účinnosť zosilňovača 76%.

10.1.2 Výpočet zosilnenia

Ďalším parametrom ktorý som meral bolo zosilnenie zosilňovača tzv. zisk zosilňovača. Vstupná frekvencia je nastavená na hodnotu 1kHz. Napájanie U_{cc} 12 V odoberaný prúd 630mA. Vstupné napätie U_{vst} generátoru je 1V špička – špička (peak to peak). Hodnota výstupného napätia U_{vyst} je 10V špička – špička (peak to peak).

Zosilnenie vypočítame podľa vzťahu (15).

$$A_U = \frac{U_{\text{vyst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{10}{1} = 10 \quad (15)$$

Toto zosilnenie je dané zapojením vývodov GAIN0 a GAIN1. To znamená, že tieto vývody boli zapojené na zem a z toho vyplýva, že zosilnenie je najmenšie t.j. 10.

10.1.3 Výpočet harmonického skreslenia

Pri prechode signálu zosilňovačom môže dochádzať k dvom základným druhom skreslenia a to k lineárnemu a nelineárnemu skresleniu. Lineárne skreslenie sa prejavuje závislosťou zosilnenia A_U na frekvencii. Je to taký druh skreslenia ktorý je občasný. Častejšie vyskytované skreslenie je nelineárne. To znamená, že dôjde k odchýleniu výstupného tvaru od vstupného .

Na vstup zosilňovača je privedený sínusový signál. Pri prechode tohto signálu zosilňovačom dôjde k harmonickému skresleniu. To znamená, že tvar signálu ktorý vstupuje do zosilňovača neodpovedá tvaru signálu na výstupe zosilňovača.

Skreslenie je dané všetkými harmonickými k prvej harmonickej. V tomto prípade budeme merať hodnoty do 5 harmonickej.

1 kHz	+ 23,4 dBm
2 kHz	- 19,9 dBm
3 kHz	- 43 dBm
4 kHz	- 40 dBm
5 kHz	- 40 dBm

Tab.č:3 Tabuľka nameraných hodnot

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = 10 \cdot \log \frac{\frac{U^2}{R}}{P_0}$$

$$\frac{U^2}{R} = 10^{\frac{L_p}{10}} \cdot 0,001, \quad R = 50 \Omega$$

$$U^2 = 10^{\frac{L_p}{10}} \cdot 0,05$$

Záťaž je daná použitým meracím prístrojom.

$$THD_D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}}{\sqrt{U_1^2}}$$

Príklad výpočtu :

$$U_1^2 = 10^{\frac{+23,4}{10}} \cdot 0,05 = 218,78 \cdot 0,05 = 10,9 \text{ V}$$

$$U_2^2 = 10^{\frac{-19,9}{10}} \cdot 0,05 = 0,010 \cdot 0,05 = 5,116 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

.

.

Výpočet celkového skreslenia :

$$THD_D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}}{\sqrt{U_1^2}} = \frac{\sqrt{5,2411 \cdot 10^{-4}}}{10,9} = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,21\%$$

10.1.4 Meranie meznej frekvencie

Generátor frekvencie bol nastavený na hodnotu 1 kHz. Tomu odpovedala efektívna hodnota 3,36 V na záťaži 4 Ω . Mezná frekvencia sa určuje pri poklese o 3dB. To znamená, že sa počíta 70 % z efektívnej hodnoty. Táto hodnota sa rovná 2,25 V. Zvyšovaním frekvencie sa dostávame na hodnotu 2,25 V. Toto napätie pripadlo na frekvenciu 57 kHz. Tzn. že hodnota hornej meznej frekvencie je rovná hodnote 57 kHz. Tým istým spôsobom sa meria aj dolná mezná frekvencia. Na generátore sa

postupne znižuje frekvencia , až kým sa nedostaneme na efektívnu hodnotu 2,25 V. Tejto hodnote pripadla frekvencia 46 Hz.

Horná mezná frekvencia – 57 kHz

Dolná mezná frekvencia – 46 Hz

10.2 Zosilňovač triedy AB s IO TDA2030

10.2.1 Výpočet účinnosti

Preverenie vlastností zosilňovača triedy AB s IO TDA2030 bolo prevedené na nepájavom kontaktnom poli podľa schémy zapojenia obr.č.23. Ako výstupná záťaž bola zvolená záťaž $1 \times 4\Omega$. Obvod je napájaný hodnotou $U_{cc} = 12 \text{ V}$. Obvod odoberá bez pripojenia záťaže kludový prúd 23,6 mA. Vstupná frekvencia je nastavená na hodnote 1 kHz.

Po pripojení záťaže na oba kanále hodnotou 4Ω sa hodnota odoberaného prúdu zvýšila na hodnotu 717 mA. Výstupný výkon vypočítame podľa vzťahu (16).

$$P_{VYST} = U_{vyst} \cdot I = 2,72 \cdot 0,717 = 1,95 \text{ W} \quad (16)$$

Príkon sa vypočíta z napájacieho napätia a odoberaného prúdu podľa vzťahu (17).

$$P = 12 \cdot 0,346 = 4,2 \text{ W}. \quad (17)$$

Následne vypočítame účinnosť zosilňovača podľa vzťahu (18).

$$\eta = \frac{P_{Vyst}}{P} = \frac{1,95}{4,2} = 0,46 = 46\% \quad (18)$$

Podľa hodnôt nameraných a vypočítaných nám vyšla výsledná účinnosť zosilňovača 46%.

10.2.2 Výpočet zosilnenia

Ďalším parametrom ktorý som meral bolo zosilnenie zosilňovača tzv. zisk zosilňovača. Vstupná frekvencia je nastavená na hodnotu 1kHz. Napájanie U_{cc} 12 V odoberaný prúd 630mA. Vstupné napätie U_{vst} generátoru je 0,4 V špička – špička (peak to peak). Hodnota výstupného napätia $U_{výst}$ je 8,1 V špička – špička (peak to peak).

Následne sa výstupne zosilnenie vypočíta podľa vzťahu (19).

$$A_U = \frac{U_{výst}}{U_{vst}} = \frac{8,1}{0,4} = 20,25 \quad (19)$$

Ako vidíme zosilnenie tohto zosilňovača triedy AB je 2x väčšie ako u triedy D.

10.2.3 Výpočet harmonického skreslenia

Ako som už spomínal na vstup zosilňovača je privedený sínusový signál. Pri prechode tohto signálu zosilňovačom dôjde k harmonickému skresleniu. To znamená, že tvar signálu ktorý vstupuje do zosilňovača neodpovedá tvaru signálu na výstupe zosilňovača.

Skreslenie je dané všetkými harmonickými k prvej harmonickej. V tomto prípade budeme merať hodnoty do 5 harmonickej.

1 kHz	+ 21,6 dBm
2 kHz	- 48,5 dBm
3 kHz	- 48,8 dBm
4 kHz	- 53,8 dBm
5 kHz	- 51 dBm

Tab.č:4 Tabuľka nameraných hodnôt

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = 10 \cdot \log \frac{\frac{U^2}{R}}{P_0}$$

$$\frac{U^2}{R} = 10^{\frac{L_p}{10}} \cdot 0,001, \quad R = 50 \Omega$$

$$U^2 = 10^{\frac{L_p}{10}} \cdot 0,05$$

Záťaž je daná použitým meracím prístrojom.

$$THD_D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}}{\sqrt{U_1^2}}$$

Príklad výpočtu :

$$U_1^2 = 10^{\frac{21,6}{10}} \cdot 0,05 = 144,54 \cdot 0,05 = 7,23 \text{ V}$$

$$U_2^2 = 10^{\frac{-48,5}{10}} \cdot 0,05 = 1,413 \cdot 0,05 = 7,06 \cdot 10^{-7} \text{ V}$$

.

.

Výpočet celkového skreslenia:

$$THD_{AB} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}}{\sqrt{U_1^2}} = \frac{\sqrt{19,7 \cdot 10^{-3}}}{7,23} = 1,941 \cdot 10^{-4} \cdot 100 = 0,01941\%$$

10.2.4 Meranie meznjej frekvencie

Generátor frekvencie bol nastavený na hodnotu 1 kHz. Tomu odpovedala efektívna hodnota 2,72 V na záťaži 4 Ω . Mezná frekvencia sa určuje pri poklese o 3dB. To znamená, že sa počíta 70 % z efektívnej hodnoty. Táto hodnota sa rovná 1,9 V. Zvyšovaním frekvencie sa dostávame na hodnotu 1,9 V. Toto napätie pripadlo na frekvenciu 225 kHz. Tzn. že hodnota hornej meznjej frekvencie je rovná hodnote 225 kHz. Tým istým spôsobom sa meria aj dolná mezná frekvencia. Na generátore sa postupne znižuje frekvencia , až kým sa nedostaneme na efektívnu hodnotu 1,9 V. Tejto hodnote pripadla frekvencia 43 Hz.

Horná mezná frekvencia – 225 kHz

Dolná mezná frekvencia – 43 Hz

11 Záver

V závere by som chcel zhodnotiť výsledky diplomovej práce. Cieľom diplomovej práce bolo popísať princíp zosilňovača triedy D a porovnať jeho vlastnosti s inými triedami zosilňovačov. Druhá časť sa venovala konkrétnemu návrhu zosilňovača triedy D , preverenie jeho vlastností a porovnaní s iným zosilňovačom v tomto prípade zosilňovačom pracujúcim v triede AB. Zosilňovač triedy D vychádzal z vhodne zvolenej blokovej schémy. Následne z integrovaných obvodov, ktoré boli použité či už pri návrhu komparátoru , generátoru a výkonovej časti. Je možné ako som už spomínal využiť IO alebo tvorbu z diskretných súčiastok. Vybral som voľbu IO z dôvodu jednoduchšieho návrhu. Schémy boli vytvorené v programe Microsoft Visio 2010.

Ako vidíme z nameraných parametrov a následného vypočítania u zosilňovača triedy D vyšla účinnosť 76 %. Najväčšou výhodou konštrukcie triedy D je vysoká účinnosť až 80%.

Namerané hodnoty					
TRIEDA	Účinnosť	Zosilnenie	Skreslenie	Mezná f. horná	Mezná f. dolná
D	76%	10	0,21%	57 kHz	46 Hz
AB	46%	20,25	0,02%	225 kHz	43 Hz

Tab.č:5 Zhodnotenie nameraných hodnôt

Zosilňovače triedy B majú účinnosť menšiu ako 50% a s triedou A je to ešte horšie. Táto vysoká účinnosť vyplýva z princípu činnosti výkonových tranzistorov zosilňovača. Tieto sú totiž buď plne zopnuté alebo úplne vypnuté. Z toho vyplýva ale aj nevýhoda - väčšie skreslenie, ako majú zosilňovače tried A a AB. To vidíme aj na výslednej účinnosti triedy AB 46%. Teoreticky za ideálnych podmienok môžu zosilňovače triedy AB dosiahnuť za ideálnych podmienok účinnosti až okolo 75 % v skutočnosti v praxi ide o hodnotu 50 – 60 %. To znamená, že prakticky vypočítaná hodnota 46 % sa blíži k hodnotám praktickým. Zosilnenie zosilňovača triedy vyšlo 10 pričom u triedy AB vyšlo dvojnásobné.

Skreslenie u triedy D vyšlo 0,21 % čo iba potvrdilo, že skreslenie u triedy D je väčšie ako u triedy AB. U triedy AB vyšlo minimálne a to 0,02 %.

Použitá literatura

[1] ŠTÁL, Petr. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D*. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-230-5.

[2] BARTOŇ, Karel. *Amatérské rádio : Konstrukční elektronika*. Praha : AMARO s.r.o., 2002. Výkonové zesilovače v pracovní třídě A, B, AB, C, D, G, H, S, T, s. 4-5.

[3] MECA, Pavel. *Amatérské rádio : Časopis pro praktickou elektroniku*. Praha : AMARO s.r.o., 1997. Návrh filtrů s operačními zesilovači, s. 11-13.

[4] DOLEČEK, Jaroslav. *Přenosy v lineárních obvodech a úvod do zesilovačů*. 4. vyd. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-185-3.

[5] [online]. [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/pavelSKL7/d/23397948-null>

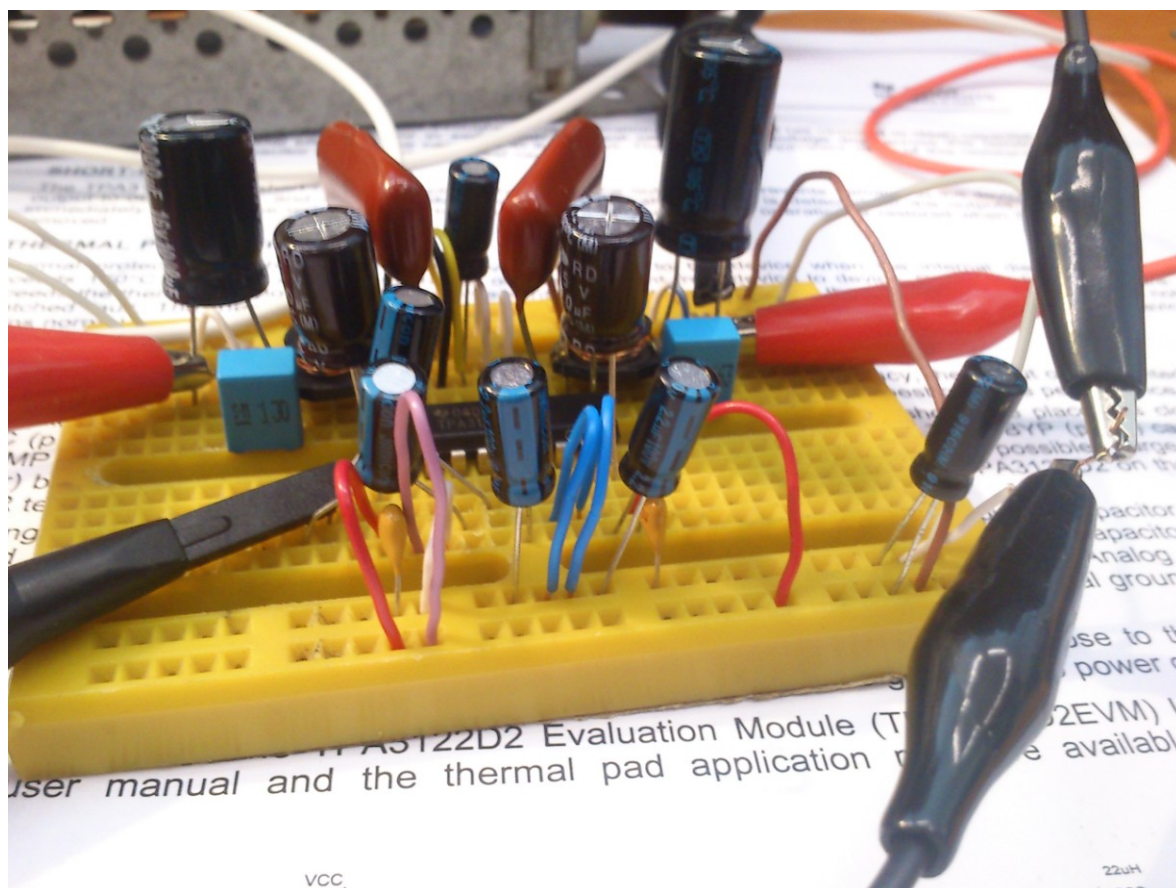
[6] [online]. [cit. 2012-04-23]. Dostupné z:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28051

[7] [online]. [cit. 2012-04-23]. Dostupné z:
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/236448/TI/TPA3122D2.html>

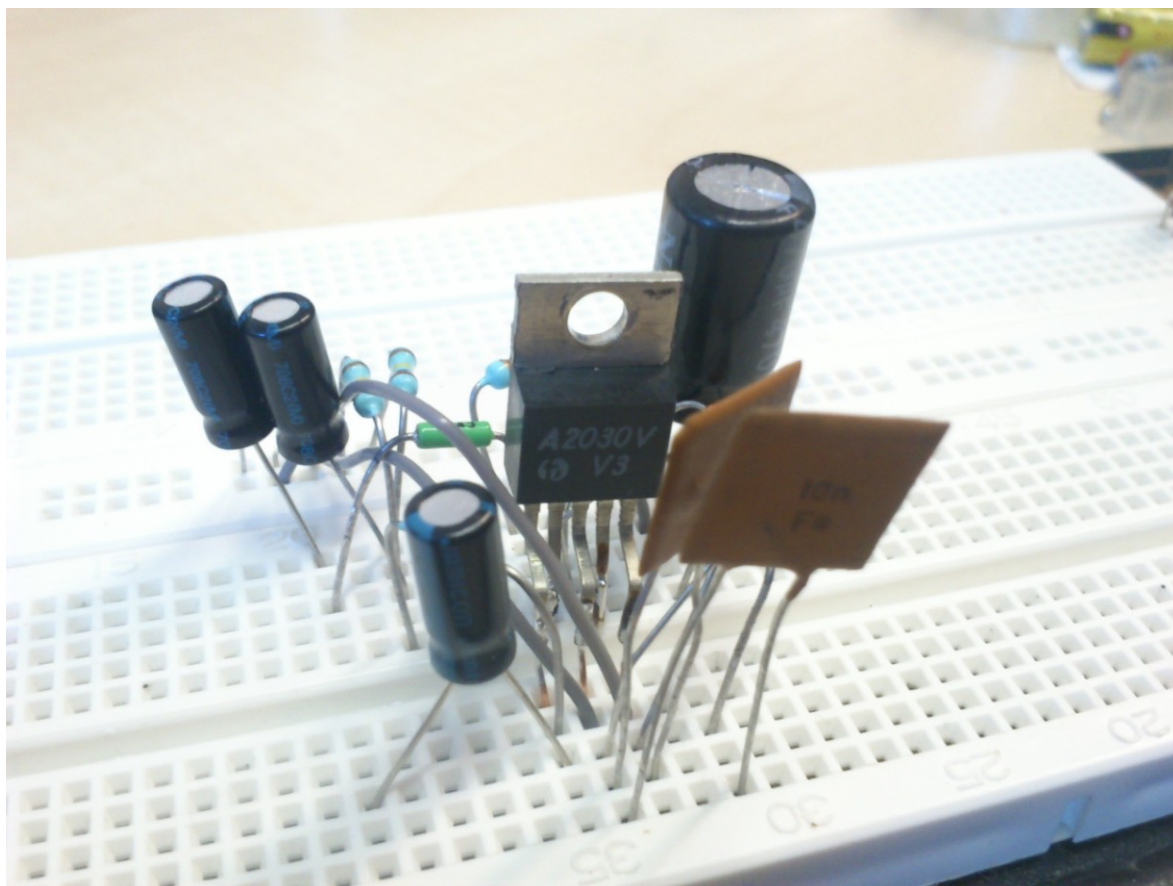
Zoznam príloh

Príloha A: Schéma zapojenia obvodu TPA 3122D2.....	I
Príloha B: Schéma zapojenia obvodu TDA2030.....	II
Príloha C: Adresová štruktúra priloženého CD.....	III

Príloha A: Zapojení obvodu TPA3122D2



Príloha B: Zapojenie obvodu TDA2030



Príloha C: Adresová štruktúra priloženého CD

/Diplomová práca	/Diplomová práca vo formáte .pdf
/Použité prístroje	/Prístroje